

Aus der Professur Landeskulturelle Ingenieurbauwerke
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

Geotechnische Untersuchung und Bewertung bautechnischer Eignung von Müllverbrennungsschlacken und deren Gemischen mit Böden

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von

M.Sc. Sven-Henning Schlömp

aus Magdeburg

Rostock, den 31.05.2014

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke,
Geotechnik und Küstenwasserbau
Universität Rostock

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Turczynski

Fachbereich Bauwesen
Hochschule Magdeburg-Stendal

Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Sikora

Dept. of Geotechnics, Geology & Maritime Engineering
Gdansk University of Technology, Polen

Tag der öffentlichen Verteidigung: 9. Dezember 2014

Abstract of the dissertation
„Geotechnical analysis and assessment of slags
from waste incineration and their mixtures with soils“

presented by Sven-Henning Schlömp

Within the German law of circular economy it is claimed to give the avoidance of generating waste priority over its reuse, recycling and its further processing. If waste can't be fit into the mentioned measures, the only choice left is its disposal.

Since June 1st of 2005, urban waste as well as other types of waste containing biodegradable parts, have to be either thermally or bio-mechanically treated before storage. With a background like this and a for all practical purposes not entirely manageable prevention of waste, the focus of waste management is now on optimizing waste incineration for quite some time. Assuming that, with current scientific knowledge, one ton of waste input can be turned into 300 kilogram combustion slag. The amount of combustion slag Germany is producing, reaches 13.000.000 tons every year, which again opens up an enormous potential for the building sector.

With a decrease of the current main recycling course in dealing with combustion slag, its disposal and long term storage as well as an increase in slag emergence from waste incineration, the prospective demand on utilization opportunities is increasing.

Taking this in consideration, this paper especially deals with potential applications for combustion slag within the field of geotechnical engineering. Mainly essential for this is the definition of soil mechanical and hydraulical parameters of the combustion slag, in order to compare its geotechnical behavior with conventional soil types. In addition to that, the usage of long term approved methods for soil parameter determination as well as soil mechanical calculations will be tested on the combustion slag, because slag is not considered as true soil by geotechnical meaning. Moreover combustion slag is an anthropogenic mixture of substances with soil-like characteristics.

Regarding to this, a specifically developed test program for the combustion slag brings up new insights, from which its geotechnical installation and limits as well as specific adjustments for the experimental methods and unconventional interpretations can be verified. As statically relevant soil characteristics such as proctor density, shear strength and subsidence behavior get looked upon closer with this program, it is shown that combustion slag is having lower values, except for inner friction angle and cohesion, than a conventional soil with the same grading.

Therefore combustion slag puts up less resistance against inner and outer influences. Other notable differences between conventional soil and combustion slag can be noticed within the hydraulic permeability. The examined soil having the same grading as the analyzed combustion slag proved to be a lot more impermeable. An adaption of geotechnical combustion slag with conventional soils can be achieved by replacing the grain fractions of the slag with appropriate soil grain. As particularly effective the replacement of fine grain fractions up to 4 mm was stated.

Long term behavior of the combustion slag is different from long term behavior of conventional soils. Its volume consistency changes by substantial consistence and conditioning methods whereby inner chemical reactions with volume increase can last several years. Additionally, significant changes due to freeze-thaw-cycles have to be taken in consideration over the entire usage period of the building. Similar to the improvement of the geotechnical characteristics, the long term behavior of the slag can be enhanced by adding soil or partial grain substitutes as well.

All in all, combustion slags have to be classified as soil-like recycling materials that are not equivalent to normal grown soils. Based on the ascertained characteristics and considering the requirements of a specific parameter determination for buildings, there are still tasks within geotechnical engineering where soil mechanical, hydraulic and chemical qualities of combustion slag is absolutely sufficient. Potential applications could be foundations of buildings with a low rate of load entry or small demands on settlement behavior as well as buildings with low demands on deformation.

Further geotechnical analyses on combustion slag need to be directed in a way that the standardized soil mechanical experiments within laboratories as well as all apparatuses need to be adjusted to combusted slag requirements. The size of the test series hereby needs to be chosen in way that the combustion slag concerning factors of safety for the correlating parameters can be drawn from the experiment. In addition to that, the methods for the determination of economical relevant slag ingredients need to be cherished to in-situ-conditions.

Other prospective considerations basically come from an optimization of the geotechnical combustion slag quality indeed whereby the influence of the grain size distribution towards the geotechnical behavior of the combustions slag needs to be analyzed within this coherence.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	III
Bilderverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Anlagenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
Symbolverzeichnis	XI
Kapitel 1 Einführung und Zielsetzung	1
Kapitel 2 Wissens- und Technikstand zu Müllverbrennungsschlacken	3
2.1 Müll als Ausgangsstoff der MV-Schlacke-Herstellung	3
2.2 Einfluss der Verbrennungsverfahren auf die MV-Schlacke	7
2.3 Aufbereitung der MV-Schlacke	10
2.4 MV-Schlacke als geotechnischer Ersatzbaustoff	14
Kapitel 3 Art der untersuchten Materialien	17
3.1 Grundlagen zur Auswahl der untersuchten MV-Schlacken und Böden	17
3.2 Aufbereitung der Probengemische	18
3.2.1 Auswahl der Probenkörnungslinie	19
3.2.2 Zusammensetzung der Proben	20
Kapitel 4 Geotechnische Bewertung	22
4.1 Versuchsprogramm	22
4.2 Versuchsergebnisse und Grenzen der Untersuchungsverfahren	23
4.2.1 Korngrößenverteilung	23
4.2.2 Korndichte	26
4.2.3 Glühverlust	27
4.2.4 Proctordichte	29
4.2.5 Druck-Setzungs-Verhalten	38
4.2.6 Scherfestigkeit	52
4.2.7 Wasserdurchlässigkeit	59
4.2.8 Widerstand gegen Frost-Tau-Einflüsse	64
4.2.9 MV-Schlacke-Einfluss auf Geokunststoffe und geotechnische Stähle	67
4.2.10 Raumbeständigkeit in Abhängigkeit vom Schlackealter	71
4.3 Validität geotechnischer MV-Schlacke-Kennwerte	75
4.4 Gleichwertigkeit von MV-Schlacke und gewachsenem Boden	78

	Seite
Kapitel 5 Praxisaspekte der geotechnischen Analyse und Anwendung	81
5.1 Bau- und labortechnische Grenzen	81
5.1.1 Bautechnische Gesichtspunkte	81
5.1.2 Labortechnische Gesichtspunkte	85
5.2 Verbesserung der geotechnischen Qualität von MV-Schlacke	86
5.3 Aspekte des europäischen Sicherheitskonzeptes	89
Kapitel 6 Bau- und geotechnische Sichtweise auf Umweltaspekte	91
6.1 Diskrepanz zwischen laborchemischer Analyse und geotechnischem Verhalten	91
6.2 Umweltrelevante MV-Schlackeeinhalte in situ	92
Kapitel 7 Zusammenfassung	95
Literaturverzeichnis	98
Selbstständigkeitserklärung	
Wissenschaftlicher Lebenslauf	
Thesen zur Dissertation	

Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abb. 1.1	Anzahl der Anlagen zur thermischen Abfallverwertung sowie der Deponien und Langzeitlager von 2005 bis 2011	2
Abb. 1.2	Abfallinput in Anlagen der thermischen Abfallverwertung sowie in Deponien und Langzeitlager von 2005 bis 2011	2
Abb. 2.1	Abfallfraktionsanteile des Verbrennungsanlageninputs von 1998 bis 2000	3
Abb. 2.2	Schematische Darstellung der Funktionsweise von Rostarten in Müllverbrennungsanlagen	8
Abb. 2.3	Rauchgasstromführung in Bezug auf die Brenngutstromrichtung	9
Abb. 2.4	Darstellung der Einbau- und Deponieklassen in Abhängigkeit der Zuordnungswerte	11
Abb. 2.5	Geotechnisch relevante Unterschiede zwischen gewachsenem Boden und MV-Schlacke	16
Abb. 3.1	Definierte Körnungslinie der untersuchten Proben 0/32 mm sowie obere und untere Grenzkörnungslinie nach TL SoB-StB/2004	20
Abb. 4.1-1	Definierte Körnungslinien der untersuchten Proben 0/32 mm, Lieferkörnung der MV-Schlacken 0/32 mm sowie obere und untere Grenzkörnungslinie nach TL SoB-StB/2004	23
Abb. 4.1-2	Auswertung der definierten Körnungslinien der untersuchten Proben 0/32 mm, Lieferkörnung der MV-Schlacken 0/32 mm sowie obere und untere Grenzkörnungslinie nach TL SoB-StB/2004	24
Abb. 4.2	Proctorversuch des Kiessandes	30
Abb. 4.3	Proctorversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke	30
Abb. 4.4	Proctorversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Kies	31
Abb. 4.5	Proctorversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Sand	31
Abb. 4.6	Proctorversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke	32
Abb. 4.7	Proctorversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Kies	32
Abb. 4.8	Proctorversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Sand	33
Abb. 4.9	Abhängigkeit der Probenkorndichte vom Mischungsverhältnis zwischen MV-Schlacke und Boden	34
Abb. 4.10	Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Porenanteil bei MV-Schlacke und deren Gemischen mit Kies und Sand	35

		Seite
Abb. 4.11-1	Körnungslinien der fünf Wochen alten MV-Schlacke 0/32 mm vor und nach dem Proctorversuch	36
Abb. 4.11-2	Auswertung der Körnungslinien der fünf Wochen alten MV-Schlacke 0/32 mm vor und nach dem Proctorversuch	37
Abb. 4.12	Eindimensionaler Kompressionsversuch des Kiessandes	39
Abb. 4.13	Eindimensionaler Kompressionsversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke	40
Abb. 4.14	Eindimensionaler Kompressionsversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Kies	41
Abb. 4.15	Eindimensionaler Kompressionsversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Sand	42
Abb. 4.16	Eindimensionaler Kompressionsversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke	43
Abb. 4.17	Eindimensionaler Kompressionsversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Kies	44
Abb. 4.18	Eindimensionaler Kompressionsversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Sand	45
Abb. 4.19	Maximale Konsolidierungszeit je Laststufe des Kiessandes	46
Abb. 4.20	Maximale Konsolidierungszeit je Laststufe der MV-Schlacken	46
Abb. 4.21	Maximale Konsolidierungszeit je Laststufe der Schlacke-Kies-Gemische	47
Abb. 4.23	Scherversuch des Kiessandes	53
Abb. 4.24	Scherversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke	53
Abb. 4.25	Scherversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Kies	54
Abb. 4.26	Scherversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Sand	54
Abb. 4.27	Scherversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke	55
Abb. 4.28	Scherversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Kies	55
Abb. 4.29	Scherversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Sand	56
Abb. 4.30	Scherspannungsverläufe des Kiessandes, der MV-Schlacken und MV-Schlacke-Boden-Gemische	56
Abb. 4.31	Durchlässigkeitsbeiwerte des Kiessandes	60
Abb. 4.32	Durchlässigkeitsbeiwerte der MV-Schlacken und der MV-Schlacke-Boden-Gemische	61

		Seite
Abb. 4.33	Frost-Tau-Zyklus nach DIN EN 1367-1:2007-06	64
Abb. 4.34	Masseverluste aufgrund von Frost-Tau-Beanspruchungen für Körnungsbereiche > 4,0 mm bis 32,0 mm der mehrere Jahre alten MV-Schlacke und des Kiessandes	65
Abb. 4.35	Materialkennwerte aus dem Zugversuch der Stahlgitterproben	69
Abb. 4.36	Materialkennwerte aus dem Zugversuch der Kunststoffgeogitterproben	69
Abb. 4.37	Volumenänderungen mehrerer Jahre und fünf Wochen alter MV-Schlacke	73
Abb. 4.38-1	Divergenz zwischen geotechnischen Kenngrößen der MV-Schlacken und des Kiessandes	78
Abb. 4.38-2	Divergenz zwischen weiteren geotechnischen Kenngrößen der MV-Schlacken und des Kiessandes	79
Abb. 5.1	Differenzen der Stauchungen zwischen mehrerer Jahre bzw. fünf Wochen alter MV-Schlacke und Kiessand	84
Abb. 5.2	Geotechnische Kenngrößen aus den Versuchen der MV-Schlacken, der Schlacke-Boden-Gemische und des Kiessandes	88
Abb. 7.1	Geotechnische Unterschiede zwischen Böden und MV-Schlacken	96

Bilderverzeichnis

		Seite
Bild 2.1	Verbrennungsinpult im Müllbunker	5
Bild 2.2	Verbrennungsupput (Rohschlacke) im Schlackebunker	5
Bild 2.3	Rohschlacke zur Aufbereitung	10
Bild 3.1	Im BigBag gelieferte MV-Schlacke	18
Bild 3.2	Unverbranntes Material in der MV-Schlacke	18
Bild 3.3	Metalle aus dem Überkornanteil	19
Bild 4.1	Quellen des Schlacke-Kies-Gemisches der fünf Wochen alten MV-Schlacke	63
Bild 4.2	Einbau Stahlgitterelement	67
Bild 4.3	Einbau Geogitter	67
Bild 4.4	Gewässerte Probe	67
Bild 4.5	Abgedeckte Probe im Ofen bei 50°C	67
Bild 4.6	Geogitterproben für Zugversuch	68
Bild 4.7	Stahlgitterproben für Zugversuch	68
Bild 4.8	Eingespannte Geogitterprobe	68
Bild 4.9	Eingespannte Stahlgitterprobe	68
Bild 4.10	Korrosion der Aluminiumfolie	70
Bild 4.11	Lochfraß/kristalline Rückstände	70
Bild 4.12	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Raumbeständigkeit nach M HMVA	71
Bild 4.13	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Raumbeständigkeit in der Triaxialzelle	71
Bild 4.14	Probe in Latexhülle eingebaut	72
Bild 4.15	Geschlossene Triaxialzelle	72
Bild 4.16	Befüllen der Triaxialzelle im Wärmeschrunk	72
Bild 4.17	Probe der fünf Wochen alten MV-Schlacke nach dem Ausbau	74
Bild 4.18	Probe der mehrere Jahre alten MV-Schlacke nach dem Ausbau	74
Bild 4.19	Korrosionsrückstände der MV-Schlacke auf der Latexhülle	74
Bild 4.20	Bläschenbildung am Probekörper der fünf Wochen alten MV-Schlacke	75
Bild 4.21	Kristalliner Ausfall aus dem Sättigungswasser am Kontrollröhrchen	75
Bild 4.22	Kristalliner Ausfall aus dem Sättigungswasser am Kontrollröhrchen	75
Bild 5.1	Korrodierte Messuhr aus Raumbeständigkeitsversuch	86

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tab. 2.1	Zugelassene Abfallinputs zur Herstellung der untersuchten MV-Schlacke	7
Tab. 3.1	Durchschnittliche stoffliche Zusammensetzung der untersuchten MV-Schlacken	20
Tab. 3.2	Zusammensetzung der Schlacke-Boden-Gemische	21
Tab. 4.1	Versuchsergebnisse Korndichtebestimmung	26
Tab. 4.2	Versuchsergebnisse Glühverlust	28
Tab. 4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Proctorversuche	34
Tab. 4.4	Wassergehalte der fünf Wochen alten MV-Schlacke vor und nach dem Proctorversuch	35
Tab. 4.5	Maximale Setzungsänderungen im Kompressionsversuch	50
Tab. 4.6	Korrekturbeiwert zur Berücksichtigung der Zähigkeit des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur	60
Tab. 4.7	Anforderungen an den Widerstand gegen Frostbeanspruchung nach TL Gestein-StB 04	66
Tab. 4.8	Raumbeständigkeitskennwerte der fünf Wochen und mehrere Jahre alten MV-Schlacke	74
Tab. 6.1	Elutionsverfahren mit destilliertem Wasser als Elutionsmittel	91

Anlagenverzeichnis

Die Anlagen sind separat in einem Anlagenband zusammengefasst.

Anlage 1	Stoffliche Zusammensetzung MV-Schlacke
Anlage 2	Definierte Körnungslinie aller untersuchten Proben
Anlage 3	Definierte Körnungslinie / Lieferkörnung der Schlacken / Grenzkörnungslinien der TL SoB-StB 2004
Anlage 4	Körnungslinie vor und nach dem Proctorversuch
Anlage 5	Bestimmung der Korndichte
Anlage 6	Bestimmung des Glühverlustes
Anlage 7	Proctorversuch Kiessand 0-32 mm
Anlage 8	Proctorversuch MV-Schlacke 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 9	Proctorversuch MV-Schlacke-Kies-Gemisch 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 10	Proctorversuch MV-Schlacke-Sand-Gemisch 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 11	Proctorversuch MV-Schlacke 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 12	Proctorversuch MV-Schlacke-Kies-Gemisch 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 13	Proctorversuch MV-Schlacke-Sand-Gemisch 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 14	Druck-Setzungs-Versuch/Zeit-Setzungs-Versuch Kiessand 0-32 mm
Anlage 15	Druck-Setzungs-Versuch/Zeit-Setzungs-Versuch MV-Schlacke 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 16	Druck-Setzungs-Versuch/Zeit-Setzungs-Versuch MV-Schlacke-Kies-Gemisch 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 17	Druck-Setzungs-Versuch/Zeit-Setzungs-Versuch MV-Schlacke-Sand-Gemisch 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 18	Druck-Setzungs-Versuch/Zeit-Setzungs-Versuch MV-Schlacke 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 19	Druck-Setzungs-Versuch/Zeit-Setzungs-Versuch MV-Schlacke-Kies-Gemisch 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 20	Druck-Setzungs-Versuch/Zeit-Setzungs-Versuch MV-Schlacke-Sand-Gemisch 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 21	Scherversuch Kiessand 0-32 mm
Anlage 22	Scherversuch MV-Schlacke 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 23	Scherversuch MV-Schlacke-Kies-Gemisch 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 24	Scherversuch MV-Schlacke-Sand-Gemisch 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 25	Scherversuch MV-Schlacke 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 26	Scherversuch MV-Schlacke-Kies-Gemisch 0-32 mm fünf Wochen alt

Anlage 27	Scherversuch MV-Schlacke-Sand-Gemisch 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 28	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes Kiessand 0-32 mm
Anlage 29	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes MV-Schlacke 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 30	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes MV-Schlacke-Kies-Gemisch 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 31	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes MV-Schlacke-Sand-Gemisch 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 32	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes MV-Schlacke 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 33	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes MV-Schlacke-Kies-Gemisch 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 34	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes MV-Schlacke-Sand-Gemisch 0-32 mm fünf Wochen alt
Anlage 35	Bestimmung des Trockenmassenverlustes bei Frost-Tau-Beanspruchung MV-Schlacke 0-32 mm mehrere Jahre alt
Anlage 36	Bestimmung des Trockenmassenverlustes bei Frost-Tau-Beanspruchung Kiessand 0-32 mm
Anlage 37	Zugversuch Stahlgitterelemente
Anlage 38	Zugversuch Kunststoffgeogitterelemente
Anlage 39	Versuche zur Raubeständigkeit in der Triaxialzelle MV-Schlacke 0-32 mehrere Jahre/fünf Wochen alt

Abkürzungsverzeichnis

AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung [1-5]
a.n.g.	Anderweitig nicht genannte
AS	Abfallschlüssel
AVV	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung) [1-3]
BGBI	Bundesgesetzblatt
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung [1-6]
DepV	Deponieverordnung [1-4]
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz [1-1]
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
M HMVA	Merkblatt über die Verwendung von Hausmüll- verbrennungsasche im Straßenbau [2-4]
MV-Schlacke / MVS	Müllverbrennungsschlacke
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall [1-2]
TL Gestein-StB 04	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau [2-3]
TL SoB-StB2004	Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau [2-2]
Z0-5	Zuordnungswerte nach LAGA M20 [2-6]

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

a	1 Probenlänge im Schergerät 2 Standrohrquerschnitt im Durchlässigkeitsversuch
A	Probenquerschnitt im Durchlässigkeitsversuch
a_f	Nominelle Zugfestigkeit der Geokunststoffgitter
A_{gt}	Gleichmaßdehnung
B	Breite des Scherkastens
c'	Kohäsion
C	Empirischer Gesteinsbeiwert
C_c	Krümmungszahl
C_u (U)	Ungleichförmigkeitszahl
d_{10}	Korndurchmesser in mm bei 10 % Siebdurchgang bezogen auf die Gesamtmasse
d_{60}	Korndurchmesser in mm bei 60 % Siebdurchgang bezogen auf die Gesamtmasse
d	1 Durchmesser des Proctortopfes 2 Asphaltbetonstärke
E	Elastizitätsmodul
E_d	Bemessungswert von Beanspruchungen
E_k	Charakteristische Einwirkungen
E_s	Steifemodul
E_{sj}	Steifemodul des Spannungsintervalls j bzw. Steifemodul der j-ten Lasterhöhung im Kompressionsversuch
F	Massenverlust durch Frost-Tau-Wechsel
fg (fgr)	Feinkiesiger Boden
fs (fsa)	Feinsandiger Boden
G (Gr)	Kies
gg (cgr)	Grobkiesiger Boden
gG (cGr)	Grobkies
GI	Kies, intermittierend gestuft
gs (csa)	Grobsandiger Boden
GU	Kies-Schluff
GW	Kies, weit gestuft

h	1 Höhe des Proctortopfes 2 Probenhöhe
H	Einbauprobenhöhe im Schergerät
h_0	Probenhöhe zu Beginn des Kompressionsversuchs
h_1	Hydrostatische Druckhöhe am Anfang der Messung
h_2	Hydrostatische Druckhöhe am Ende der Messung
h_{i-1}	Probenhöhe am Ende der Laststufe $i-1$ bzw. zu Beginn der nachfolgenden Lasterhöhung im Kompressionsversuch
H_{\max}	Maximale Probenhöhe im Schergerät
H_{\min}	Minimale Probenhöhe im Schergerät
i	1 Strömungsgefälle 2 Aktuelle Laststufe im Kompressionsversuch
j	Lasterhöhung zwischen Laststufe $i-1$ und Laststufe i im Kompressionsversuch
k	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (k-Wert)
k_{10}	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (k-Wert) bei 10°C Wassertemperatur
k_f	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (Filtrationskoeffizient)
k_T	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert bei Wassertemperatur T
L	Länge des Scherkastens
l_0	Höhe des Probenkörpers
M_1	Probentrockenmasse vor Frost-Tau-Wechseln
M_2	Probentrockenmasse nach Frost-Tau-Wechseln und Absiebung
$M\%$	Massenprozent
mg (mgr')	Mittelkiesiger Boden
mG (mGr)	Mittelkies
ms (msa)	Mittelsandiger Boden
mWS	Meter Wassersäule
n	Porenanteil
Q	Wasserdurchfluss
$Q_{k,1}$	Veränderliche Leiteinwirkung
$Q_{k,i}$	Veränderliche Begleiteinwirkungen
Q_{rep}	Repräsentative veränderliche Gesamteinwirkung
R_d	Bemessungswert von Widerständen
R_k	Charakteristische Widerstände
R_m	Nominelle Zugfestigkeit der Stahlgitter

S (Sa)	Sand
SE	Sand, eng gestuft
s_i	Setzung der Laststufe i im Kompressionsversuch
s_{i-1}	Setzung der Laststufe i-1 im Kompressionsversuch
s_j	Setzung der j-ten Lasterhöhung im Kompressionsversuch
SU	Sand-Schluff
t	Messzeit
T	Wassertemperatur
T (Cl)	Ton
u (si)	Schluffiger Boden
U (Si)	Schluff
v	Filtergeschwindigkeit nach Darcy
V_{gl}	Glühverlust
V_K	Volumen der festen Körner im Kompressionsversuch
V_P	Porenraumvolumen im Kompressionsversuch
V_0	Probenvolumen zu Beginn des Kompressionsversuchs
w	Wassergehalt
w_{Pr}	Optimaler Wassergehalt bei Porctordichte
w_{95}	Wassergehalt bei 95 % der Porctordichte
w_{97}	Wassergehalt bei 97 % der Porctordichte

Griechische Buchstaben

γ_{AC}	Wichte Asphaltbeton
γ_E	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert der veränderlichen Gesamteinwirkung
γ_R	Teilsicherheitsbeiwert für Widerstände
ε	Höchstzugkraftdehnung
ε_1 Boden	Vertikale Stauchung von Boden
$\varepsilon_2, \varepsilon_3$	Horizontale Stauchungen in Längs- und Querrichtung
ε_{Boden}	Gesamtstauchung von Boden
ε_{elK}	Stauchung aus elastischer Verformung der festen Körner
ε_i	Bezogene Gesamtsetzung (Gesamtstauchung) am Ende einer Laststufe i im Kompressionsversuch

ε_j	Stauchung der j-ten Lasterhöhung im Kompressionsversuch
$\varepsilon_{\text{MV-Schlacke}}$	Gesamtstauchung von MV-Schlacke
ε_{plK}	Stauchung aus plastischer Verformung der festen Körner
ε_{plP}	Stauchung aus plastischer Verformung der Porenräume
ν	Querkontraktionszahl
ρ_{95}	95 % der Porctordichte
ρ_{97}	97 % der Porctordichte
ρ_d	Trockendichte
ρ_{Pr}	Porctordichte
ρ_s	Korndichte (Rohdichte)
$\rho_{s, \text{Gemisch}}$	Korndichte des MV-Schlacke-Kies-Gemisches Korndichte des MV-Schlacke-Sand-Gemisches
$\rho_{s, \text{Kies}}$	Korndichte (Rohdichte) des Kiesanteils
$\rho_{s, \text{Sand}}$	Korndichte (Rohdichte) des Sandanteils
$\rho_{s, \text{Schlacke}}$	Korndichte (Rohdichte) der MV-Schlacke
σ'	Normalspannung im Scherversuch
σ_1	Vertikale Spannungen
σ_2, σ_3	Horizontale Spannungen in Längs- und Querrichtung
σ_{AC}	Erzeugte Spannung aus Asphaltbeton
σ_i	Spannung der Laststufe i im Kompressionsversuch
σ_{i-1}	Spannung der Laststufe i-1 im Kompressionsversuch
σ_j	Spannung der j-ten Lasterhöhung im Kompressionsversuch
σ_N	Normalspannung
τ_f	Scherfestigkeit
φ'	Innerer Reibungswinkel
$\psi_{Q,i}$	Kombinationsbeiwert der veränderlichen Begleiteinwirkung

Kapitel 1

Einführung und Zielsetzung

Die abfallpolitischen Zielsetzungen in Deutschland fordern, der Vermeidung von Abfällen den Vorrang vor ihrer Wiederverwendung, ihrem Recycling und ihrer Verwertung zu geben ([1-1] §6 Abs. 1). Können Abfälle keiner der zuvor genannten Maßnahmen zugeführt werden, bleibt als letzte Hierarchiestufe der Abfallbewirtschaftung ihre Beseitigung (*ebd.*).

Vor ihrer Ablagerung müssen seit dem 1. Juni 2005 in Deutschland Siedlungsabfälle und andere Abfälle mit biologisch abbaubaren Bestandteilen thermisch oder mechanisch-biologisch behandelt werden. Der Grund hierfür sind die mit diesem Datum ablaufenden letzten Ausnahmeregelungen der TA Siedlungsabfall [1-2] und der Abfallablagerungsverordnung [1-5] sowie die neu geltenden Zuordnungskriterien der Deponieverordnung [1-4]. Mit derartigem Hintergrund und einer in der Praxis nicht vollends zu realisierenden Abfallvermeidung ist der abfallwirtschaftliche Fokus seit geraumer Zeit verstärkt auf den Ausbau und die Optimierung der Abfallbehandlung gerichtet. Eine zentrale Stellung nimmt dabei die Müllverbrennung ein. Werden Abfälle unter Verwendung dieser Methode inertisiert, kann zusätzlich Strom- und Wärme aus ihnen gewonnen werden. Neben der Energierückgewinnung im Verbrennungsprozess selbst, tragen auch die entstehenden Müllverbrennungsschlacken (MV-Schlacken) potentiell zur Ressourcenschonung und so zum Klimaschutz bei. Im Zuge ihrer Aufbereitung werden aus ihnen Eisen- und Nicht-Eisen-Metalle separiert und weiter verwertet sowie potentielle Baustoffe hergestellt.

Auch zukünftig befindet sich der Müllverbrennungsmarkt weltweit auf Wachstumskurs. Der Studie „Waste to Energy - Der Weltmarkt für Müllverbrennungsanlagen 2012/2013“ zufolge stieg die Jahreskapazität weltweiter Anlagen von 2007 bis 2011 um rund 12 Prozent und es ist bis 2016 mit einem weiteren Anstieg der Kapazitäten um geschätzte 21 Prozent auf 300 Millionen Jahrestonnen sowie rund 250 neuen Anlagen zu rechnen [5-1].

Auch in Deutschland zeichneten sich in der Vergangenheit diese Entwicklungstendenzen der Müllverbrennung und die damit einhergehende Steigerung der MV-Schlacke-Erzeugung ab. Das seit 2005 bundesgesetzlich festgelegte Deponieverbot für unbehandelten Restmüll war, wie aus Abbildung 1.2 deutlich wird, mitverantwortlich für eine Verlagerung der Abfallinputmengen zu Gunsten der thermischen Abfallbehandlungsanlagen.

Bei nahezu gleichbleibendem Abfallaufkommen und rückläufiger Deponie- und Langzeitlageranzahl stieg, wie die Abbildung 1.1 zeigt, der Bedarf an Anlagen zur thermischen Abfallverwertung, der bisher weitestgehend durch einen Anlagenneubau gedeckt wurde.

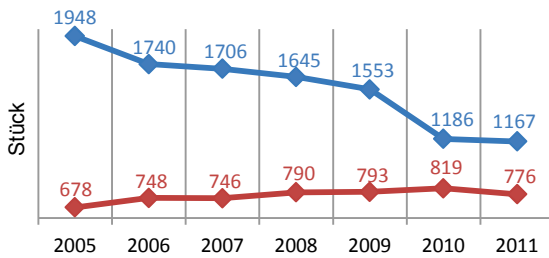


Abb. 1.1 Anlagenanzahl von 2005 bis 2011
(Werte aus [4-5] S. 4)

◆ Thermische Abfallverwertung ◆ Deponien und Langzeitlager

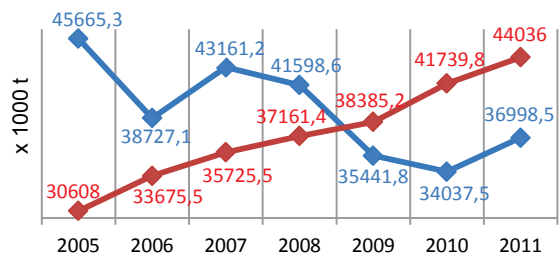


Abb. 1.2 Abfallinput von 2005 bis 2011
(Werte aus [4-5] S. 4)

Wird nach derzeitigem Kenntnisstand davon ausgegangen, dass aus einer Tonne Abfallinput annähernd 300 Kilogramm Verbrennungsschlacke entstehen, so ist deutschlandweit jährlich mit ca. 13.000.000 Tonnen MV-Schlacke zu rechnen. Das bedeutet zweierlei: Zum einen sind große Schlackemengen zu beherrschen und zum anderen eröffnet sich ein enormes Baustoffpotenzial. Eine Hauptverwertung der MV-Schlacke ist bisher der Deponiebau. Zusätzlich fielen geringere Verwertungsanteile in den Bereich des Straßen- und Wegebbaus. Mit dem Rückgang des Deponie- und Langzeitlagerbaus und dem steigenden Schlackeaufkommen aus der Müllverbrennung erhöht sich der zukünftige Bedarf an neuen Verwertungsmöglichkeiten. In dieser Arbeit wird speziell das Gebiet der Geotechnik hinsichtlich potentieller Anwendungen von MV-Schlacke untersucht. Grundlegend dafür ist eine Bestimmung der bodenmechanischen und hydraulischen Kenngrößen von Schlacke, um ihr geotechnisches Verhalten herkömmlichen Böden gegenüberstellen zu können. Weiterführend ist die Anwendbarkeit von bewährten Methoden der Bodenkennwertermittlung und bodenmechanischer Berechnungsmethoden auf die Schlacke zu prüfen, da es sich bei ihr nicht um Boden im Sinne deutscher geotechnischer Richtlinien handelt. Vielmehr ist die MV-Schlacke ein anthropogenes Stoffgemisch, das einen bodenähnlichen Charakter aufweist.

Ein gezielt entworfenes Untersuchungsprogramm kann in diesem Zusammenhang neue Erkenntnisse bringen. Die daraus resultierenden und bewerteten Stoffeigenschaften werden weiterführend die Planungssicherheit bei spezifischen Verwendungsmöglichkeiten von MV-Schlacke verstärken sowie die zugehörigen geotechnischen Einbaubedingungen und -grenzen verifizieren.

Kapitel 2

Wissens- und Technikstand zu Müllverbrennungsschlacken

2.1 Müll als Ausgangsstoff der MV-Schlacke-Herstellung

MV-Schlacken sind Mehrkomponentensysteme. Sie beinhalten durch die Verbrennung veränderte Stoffe und unverbrannte Anteile. Die Art und die Anteile der Schlackekomponenten werden unter anderem durch die der Verbrennung zugeführten Müllfraktionen generiert. Aufgrund saisonaler und abfallwirtschaftlicher Abhängigkeiten ist der Müllinput bezüglich seiner Inhaltsstoffe jedoch kaum gezielt zu regulieren, sodass die MV-Schlacke als heterogenes „Zufallsprodukt“ der thermischen Abfallbehandlung anzusehen ist.

Grundsätzlich werden in bundesdeutschen Müllverbrennungsanlagen überwiegend Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Sperrmüll behandelt. Die Fraktionen des Abfalls sind dementsprechend vielfältig, wobei organische Stoffe den überwiegenden Anteil bilden.

Die prozentuale Verteilung der Abfallfraktionen in Abbildung 2.1 wurde vom Öko-Institut e.V. basierend auf Literaturauswertungen für die Jahre 1998 bis 2000 abgeschätzt. In dieser Zeit setzte sich der verwertete Abfall näherungsweise aus 70 % Hausmüll, 8 % Sperrmüll, 14 % hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen und 8 % sonstigen Abfällen zusammen ([4-1] S. 10 ff).

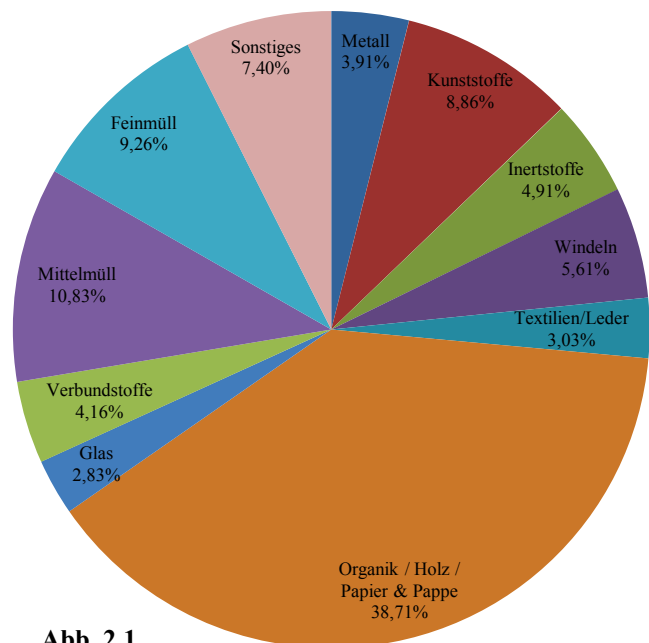


Abb. 2.1
Abfallfraktionsanteile des Verbrennungsanlageninputs
von 1998 bis 2000 (Werte aus [4-1] S. 10 u. 12)

Holz, Papier und Pappe sowie andere organische Stoffe nehmen den größten Teil des Abfallinputs ein ([4-4] S. 1405). Sie bestimmen unter anderem den Calcium- und Natriumchloridanteil in der Schlacke und besitzen einen hohen Heizwert (*ebd.*). Kunststoffe sind aus energetischer Sicht ertragreich (*ebd.*). Ihre Verbrennung beeinflusst beispielsweise den Chlorgehalt der Schlacke (*ebd.*). Gleichbedeutend mit Mittelmüll ($d = 8 - 40 \text{ mm}$) und Feinmüll ($d < 8 \text{ mm}$) nehmen sie gewichtige Anteile des Verbrennungsanlageninputs ein (*ebd.*).

Der Glasanteil im Abfallinput beeinflusst maßgebend den Siliziumgehalt der Schlacke, wobei deren Gehalt an Eisen- und Nichteisenmetallen direkt von den metallischen Mengen im zu verbrennenden Abfall abhängt ([4-4] S. 1405).

Grundlegend wird die mineralogischen Phasenzusammensetzung aller Kornfraktionen durch Müllinputveränderungen beeinflusst, jedoch wirkt sich dieser Einfluss verstärkt auf die Feinfraktionen aus ([4-2] S. 308). Die in den Feianteilen verstärkt auftretenden Mineralphasen [Anhydrit (CaSO_4) und Calcit (CaCO_3)] bestimmen ausschlaggebend das Alterungsverhalten der Schlacke, wodurch ein direkter Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung des thermisch zu verwertenden Mülls und des notwendigen Ablagerungszeitraumes bis zu einer bautechnischen Weiterverwertung der MV-Schlacke entsteht (*ebd.*). Besonders die Mitverbrennung sulfatreicher Fraktionen, wie z.B. bestimmter Sorten an Sperrmüll und Gewerbeabfall, zusammen mit Hausmüll kann eine Zunahme der Anhydritgehalte hervorrufen (*ebd.*).

In der Grobfraktion bewirken Unterschiede in der Abfallzusammensetzung vorrangig Schwankungen in den Anteilen sogenannter Durchlaufminerale, wie Quarz (SiO_2) und Kalifeldspat (KAlSi_3O_8) ([4-2] S. 271). Sie resultieren hauptsächlich aus unterschiedlichen Müllfraktionen der großen Stoffströme Hausmüll und Gewerbeabfall und werden während des Verbrennungsprozesses als Festbestandteile in die Schlacke eingebunden (*ebd.*). Relevante Glasanteilschwankungen in den groben Schlackebestandteilen beruhen ebenso auf variierenden Müllinput und setzen sich einerseits aus neu gebildeten Glasphasen und andererseits aus Bruchglasbestandteilen zusammen (*ebd.*). Keramikbruchstücke sowie Bauschuttbestandteile wie Beton, Ziegel oder Steine durchlaufen die Müllverbrennung nahezu unverändert und sind somit bezüglich ihrer Grobanteile in der Schlackekörnung direkt von der Müllzusammensetzung abhängig (*ebd.*). Eine nur untergeordnete Rolle spielen Müllinputschwankungen in Bezug auf neu entstandene Silikate und Oxide in den groben Schlackefraktionen (*ebd.*).

Die Vielfalt der zugelassenen Abfallarten zur Herstellung des zu analysierenden Probenmaterials in Tabelle 2.1 lässt darauf schließen, dass auch diese MV-Schlacken inputabhängigen Schwankungen unterliegen. Belastbare Aussagen zur Art und Zusammensetzung des probenspezifischen Müllinputs lassen sich jedoch nicht treffen, da in der Verbrennungsanlage, wie Bild 2.1 zeigt, verschiedene Abfallströme im Müllbunker vermischt und die Verbrennungsrückstände unterschiedlicher Verbrennungsroste im Schlackebunker, hier im Bild 2.2 zu sehen, zusammengeführt werden. Hinzu kommt, dass in der Aufbereitung Schlacken unterschiedlicher Verbrennungsanlagen durchaus vermischt werden können.

Dennoch sind die MV-Schlacken für Untersuchungen im Zuge dieser Arbeit als geeignet einzustufen. Sie werden bereits in der vorliegenden Form in bautechnischen Bereichen weiterverwertet und ihre Verbrennungs- bzw. Aufbereitungsregime entsprechen üblichen, in der Praxis anerkannten Verfahren.



Bild 2.1 Verbrennungsinput im Müllbunker
(eigenes Foto)



Bild 2.2 Verbrennungsausput (Rohschlacke)
im Schlackebunker (eigenes Foto)

Beispiele zugelassenen Abfallinputs zur Herstellung der analysierten MV-Schlacke

AVV - AS	Bezeichnung
03	Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten, Möbeln, Zellstoffen, Papier und Pappe
03 01	Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten und Möbeln
03 01 01	Rinden- und Korkabfälle
03 01 05	Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere mit Ausnahme derjenigen, die unter 03 01 04 fallen
03 03	Abfälle aus der Herstellung und Verarbeitung von Zellstoff, Papier, Karton und Pappe
03 03 01	Rinden- und Holzabfälle
03 03 07	Mechanisch abgetrennte Abfälle aus der Auflösung von Papier- und Pappabfällen
03 03 08	Abfälle aus dem Sortieren von Papier und Pappe für das Recycling
03 03 10	Faserabfälle, Faser-, Füller- und Überzugsschlämme aus der mechanischen Abtrennung
15	Verpackungsabfall, Aufsaugmassen, Wischtücher, Filtermaterialien und Schutzkleidung (a.n.g.)
15 01	Verpackungen (einschließlich getrennt gesammelter kommunaler Verpackungsabfälle)
15 01 01	Verpackungen aus Papier und Pappe
15 01 03	Verpackungen aus Holz
15 01 05	Verbundverpackungen
15 01 06	Gemischte Verpackungen
15 01 09	Verpackungen aus Textilien
15 02	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung
15 02 03	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung mit Ausnahme derjenigen, die unter 15 02 02 fallen
16	Abfälle, die nicht anderswo im Verzeichnis aufgeführt sind
16 02	Abfälle aus elektrischen und elektronischen Geräten
16 02 16	Aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen

(Fortsetzung der Tab. 2.1 auf Seite 6)

AVV - AS	Bezeichnung
17	Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten)
17 02	Holz, Glas und Kunststoff
17 02 01	Holz
17 09	Sonstige Bau- und Abbruchabfälle
17 09 04	Gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen
18	Abfälle aus der humanmedizinischen oder tierärztlichen Versorgung und Forschung (ohne Küchen- und Restaurantabfälle, die nicht aus der unmittelbaren Krankenpflege stammen)
18 01	Abfälle aus der Geburtshilfe, Diagnose, Behandlung oder Vorbeugung von Krankheiten beim Menschen
18 01 01	Spitze oder scharfe Gegenstände (außer 18 01 03)
18 01 04	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (z. B. Wund- und Gipsverbände, Wäsche, Einwegkleidung, Windeln)
18 01 09	Arzneimittel mit Ausnahme derjenigen, die unter 18 01 08 fallen
18 02	Abfälle aus Forschung, Diagnose, Krankenbehandlung und Vorsorge bei Tieren
18 02 01	Spitze oder scharfe Gegenstände mit Ausnahme derjenigen, die unter 18 02 02 fallen
18 02 03	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden
19	Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke
19 02	Abfälle aus der physikalisch-chemischen Behandlung von Abfällen (einschließlich Dechromatisierung, Cyanidentfernung, Neutralisation)
19 02 03	Vorgemischte Abfälle, die ausschließlich aus nicht gefährlichen Abfällen bestehen
19 02 10	Brennbare Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 02 08 und 19 02 09 fallen
19 05	Abfälle aus der aeroben Behandlung von festen Abfällen
19 05 01	Nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen
19 05 02	Nicht kompostierte Fraktion von tierischen und pflanzlichen Abfällen
19 05 03	Nicht spezifikationsgerechter Kompost
19 06	Abfälle aus der anaeroben Behandlung von Abfällen
19 06 04	Gärrückstand/-schlamm aus der anaeroben Behandlung von Siedlungsabfällen
19 06 06	Gärrückstand/-schlamm aus der anaeroben Behandlung von tierischen und pflanzlichen Abfällen
19 08	Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen (a.n.g.)
19 08 01	Sieb- und Rechenrückstände
19 09	Abfälle aus der Zubereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch oder industriellem Brauchwasser
19 09 01	Feste Abfälle aus der Erstfiltration und Siebrückstände
19 09 02	Schlämme aus der Wasserklärung
19 09 04	Gebrauchte Aktivkohle
19 09 05	Gesättigte oder gebrauchte Ionenaustauscherharze
19 12	Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen (z. B. Sortieren, Zerkleinern, Verdichten, Pelletieren) a. n. g.
19 12 01	Papier und Pappe
19 12 04	Kunststoff und Gummi
19 12 07	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 19 12 06 fällt
19 12 08	Textilien
19 12 10	Brennbare Abfälle (Brennstoffe aus Abfällen)
19 12 12	Sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 12 11 fallen

(Fortsetzung der Tab. 2.1 auf Seite 7)

AVV - AS	Bezeichnung
20	Siedlungsabfälle (Haushaltsabfälle und ähnliche gewerbliche und industrielle Abfälle sowie Abfälle aus Einrichtungen), einschließlich getrennt gesammelter Fraktionen
20 01	getrennt gesammelte Fraktionen (außer 15 01)
20 01 01	Papier und Pappe
20 01 08	Biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle
20 01 10	Bekleidung
20 01 11	Textilien
20 01 32	Arzneimittel mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 31 fallen
20 01 38	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 20 01 37 fällt
20 02	Garten- und Parkabfälle (einschließlich Friedhofsabfälle)
20 02 03	Andere nicht biologisch abbaubare Abfälle
20 03	Andere Siedlungsabfälle
20 03 01	Gemischte Siedlungsabfälle
20 03 02	Marktabfälle
20 03 03	Straßenkehricht
20 03 07	Sperrmüll
20 03 99	Siedlungsabfälle (a.n.g.)

Tab. 2.1 Zugelassene Abfallinputs zur Herstellung der untersuchten MV-Schlacke
(siehe [4-7] Teil B, S. 4-6 / vgl. auch [1-3] Teil B, S. 6, S. 21-31)

2.2 Einfluss der Verbrennungsverfahren auf die MV-Schlacke

Die Qualität und die Beschaffenheit der MV-Schlacke wird neben den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Einflüssen des Müllinputs auch vom Verbrennungsprozess beeinflusst. Besonders signifikant sind dabei die Temperaturen im Verbrennungsprozess, der mit den Reaktionsvorgängen der Trocknung, Entgasung und Vergasung beginnt und mit dem Ausbrand des Abfalls abschließt, wobei im Gutbett annähernd Temperaturen von bis zu 1000 °C entstehen. Die Durchmischung des Abfalls auf dem Rost, das Luftzufuhrregime in der Brennkammer sowie die Geometrie des Brennkammerraums über dem Rost nehmen in diesem Zusammenhang Einfluss auf die Charakteristik der Reaktionsphasen der Verbrennung. Die unterschiedlichen Verbrennungsrostarten, bei denen primär zwischen Vorschub-, Rückschub- und Walzenrost unterschieden wird, charakterisieren vornehmlich die Intensität der Vermischung und Umwälzung des zu verbrennenden Abfalls. Ihre Funktionsweise wird in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt und zeigt, dass Rückschub- und Walzenroste in Müllverbrennungsanlagen nur geneigt verbaut werden.

Vorschubroste kommen entgegen der Abbildung als einstufige oder mehrstufige Einbauvarianten vor, die jeweils in geneigter wie auch in waagerechter Position installiert sind.

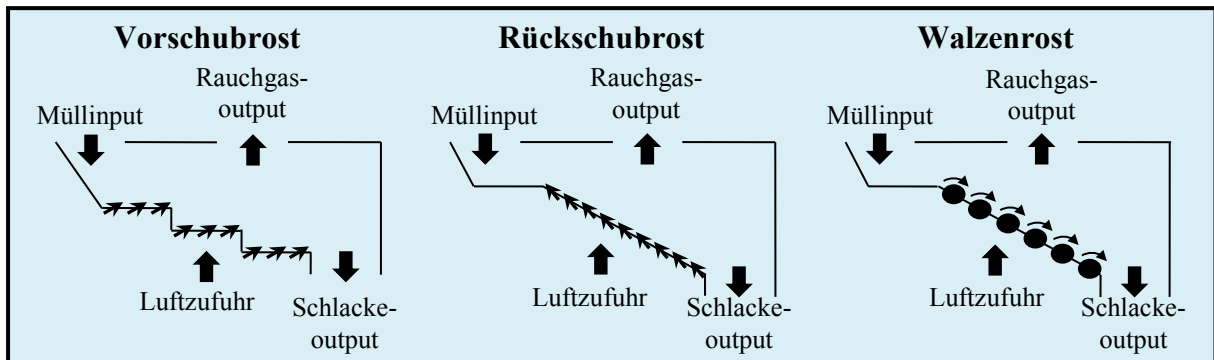


Abb. 2.2 Schematische Darstellung der Funktionsweise von Rostarten in Müllverbrennungsanlagen
(in Anlehnung an [4-6] S. 156)

Vorschub- und Rückschubroste befördern das Gutbett über mehrere Reihen feststehender und sich bewogender Roststäbe. Bei Walzenrosten hingegen durchfährt das Brenngut die Brennkammer auf mehreren Walzen, wobei der Abfall durch zwischen den Walzen befindliche Abstreifer der jeweils nächsten Walze zugeführt wird. Während des Brennguttransportes, wird über in die Roststäbe bzw. in die Walzen integrierte Systeme dem Abfall gezielt Luft zugeführt, sodass die Verbrennungsvorgänge und die Temperaturniveaus im Gutbett geregelt werden können.

Die verschiedenen Rostarten besitzen hinsichtlich der Durchmischung des Abfalls während des Verbrennungsvorganges eine jeweils spezifische Effektivität. Rückschubroste weisen durch ihre geneigt aufwärts laufende Rostbewegung eine ausgeprägte Durchmischung auf. Bei Walzenrosten wird die Durchmischung aufgrund der Walzenrotation erreicht. Die horizontal laufenden Vorschubroste erzeugen eher schwache Durchmischungseffekte, die jedoch durch die Anordnung von Roststufen intensiviert werden können. Verlaufen die Vorschubroste geneigt, ist mit ihnen eine ähnlich intensive Umwälzung des Brenngutes im Feuerraum zu realisieren, wie sie bei Rückschub- und Walzenrosten erreicht wird.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten MV-Schlacken wurden auf einem geneigten wassergekühlten Vorschubrost verbrannt, der über einen Unterwindbereich zur Primärluftzuführung verfügt. Für das Verbrennen von heizwertarmem Abfall auf diesem Rost sind zusätzliche Brenner vorgesehen, um die nach der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) vorgeschriebene Mindestverbrennungsraumtemperatur von 850 °C in allen Betriebszuständen sicherzustellen ([1-6] §6 Abs. 1).

Ein anderes Kriterium, das sich auf die Reaktionsphasen der Müllverbrennung auswirkt, definiert sich aus der Strömungsrichtung der Rauchgase im Verbrennungsraum in Bezug auf die Abfalltransportrichtung.

Die Richtung der Rauchgasströmung ist abhängig von der Geometrie des Feuerungsraumes und wird in die Möglichkeit einer Gleichstrom-, Gegenstrom- bzw. Mittelstromfeuerung unterteilt. Signifikante Unterschiede in den Strömungsverläufen und der Brennkammergeometrien der einzelnen Feuerungsarten werden in der Abbildung 2.3 deutlich.

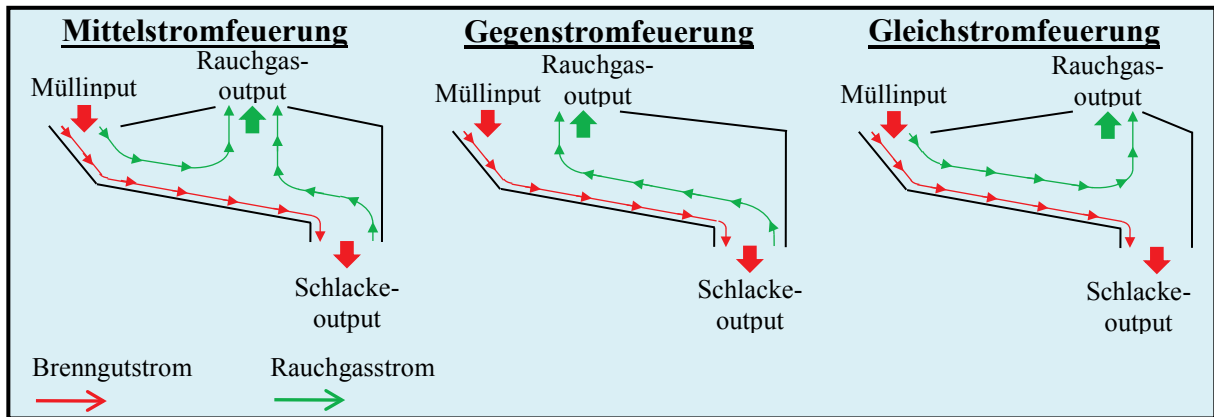


Abb. 2.3 Rauchgasstromführung in Bezug auf die Brenngutstromrichtung
(in Anlehnung an [4-6] S. 160)

Die Gleichstromfeuerung ist vorrangig für ausgeprägte Zonen der Trocknung, Ent- und Vergasung sowie der Brennstoffzündung am Rostanfang bzw. maximale Temperaturen in der Ausbrandzone am Rostende bekannt. Sie eignet sich für heizwertreiche Abfälle, da der Verbrennungsprozess nicht durch heiße Gase aus der Ausbrandzone unterstützt wird.

Im Fall einer Gegenstromfeuerung verkürzen sich die Reaktionszonen am Anfang des Verbrennungsprozesses und das Temperaturmaximum verlagert sich in Richtung Rostanfang. Durch die Unterstützung der Trocknung und Zündung des Brennstoffes, aufgrund der über den Rostanfang strömenden heißen Gase aus der Ausbrandzone, eignet sich diese Feuerungsart primär für feuchten heizwertarmen Abfall.

In deutschen Verbrennungsanlagen mit kontinuierlich wechselnder Zusammensetzung des Müllinputs und damit einhergehenden variierenden Heizwerten ist die Mittelstromfeuerung am weitesten verbreitet. Sie lässt durch gezielte Steuerung der Gasvolumenströme eine Optimierung der Reaktionsvorgänge entsprechend den Müllheizwerten zu.

Die Verbrennungsanlage, in der die untersuchten MV-Schlacken produziert worden sind, arbeitet nach dem Prinzip dieser Feuerungsart, sodass die Verbrennungsprozesse den veränderlichen Abfallfraktionen angepasst werden können.

2.3 Aufbereitung der MV-Schlacke

Das Ziel der MV-Schlackeaufbereitung ist es, Produkte herzustellen, die den Ansprüchen potenzieller Abnehmer sowie der Gesetzgebung genügen. Neben der Inertisierung und der Schadstoffabtrennung stehen dabei zum einen die Herstellung von Ersatzbaustoffen und zum anderen die Rückgewinnung von Wertstoffen im Vordergrund. In Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen der im Bild 2.3 dargestellten, direkt aus Verbrennungsanlagen gewonnenen Rohschlacken entstehen im Zuge der Schlackeaufbereitung die Stoffströme:

- Mineralische Rückstände, wie z.B. Glas, Keramik, Porzellan, Schlacke, Asche und bauschuttähnliche Bestandteile
- Eisen-Metalle
- Nichteisen-Metalle
- Unverbrannte Bestandteile, wie z.B. Papier, Pappe, Holz und Kunststoffe

(Stoffströme entsprechend der Schlackefraktionierung nach [2-5] S. 4)



Bild 2.3 Rohschlacke zur Aufbereitung
(eigenes Foto)

Die separierten unverbrannten Schlackebestandteile werden in den Verbrennungsprozess der Abfallbehandlungsanlagen zurückgegeben. Eisen- und Nichteisen-Metalle erlangen nach der Rückgewinnung aus der Rohschlacke ihre Produktfähigkeit durch weiterführende Wiederaufbereitungsprozesse, auf die jedoch hier nicht näher eingegangen wird.

Eine für bautechnische Zwecke zu verwendende MV-Schlacke besteht idealerweise ausschließlich aus mineralischen inerten Verbrennungsrückständen. Aufgrund technologisch bedingter Separierungsgrenzen befinden sich in ihr aber auch Beimengungen anderer Stoffgruppen. Die bautechnischen Verwendungsgrenzen der MV-Schlacke werden so zum einen durch die Massenanteile sowie die Eigenschaften jeder dieser Stoffgruppenbestandteile und zum anderen nach Art und Größe des von der Schlacke ausgehenden Schadstoffpotenzials definiert. Für eine möglichst hohe bautechnische Qualität der Schlacke ist demnach das Aufbereitungsregime zu optimieren und den Rohschlackeeigenschaften anzupassen.

Die Rohschlackeaufbereitung ist folglich als ein dynamisch zu regelnder Herstellungsprozess von MV-Schlacken anzusehen, bei dem explizit die in den Merkblättern der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen sowie die in den Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) definierten Randbedingungen für MV-Schlacken zu berücksichtigen sind. Der LAGA Mitteilung 20 [2-6] zufolge werden MV-Schlacken für ihre bautechnische Verwendung nach den in der Aufbereitung erreichten Schadstoffkonzentrationen in die Einbauklassen 0 bis 2 entsprechend Abbildung 2.4 eingestuft. Bei optimaler Aufbereitung der Rohschlacke ist in der Praxis jedoch oft nur der Zuordnungswert Z 2 als bestmögliche Obergrenze zu realisieren, wodurch für die MV-Schlacke maximal ein eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen in Frage kommt ([2-6] S.13 und [2-5] S. 4). Sind die Schadstoffgehalte der MV-Schlacke dennoch weiter zu reduzieren, so werden für die Schlackeverwertung in Bauwerken auch die Einbauklassen Z 0 und Z 1 möglich. Bei Überschreitung der Grenzwerte von Z 2 kommt nur noch eine Deponierung der MV-Schlacke in Betracht, wobei in diesem Fall die definierten Grenzen der Zuordnungswerte Z 3 bis Z 5 einzuhalten sind, um die Schlacken in die Deponieklassen I - III einstufen zu können ([1-5], [1-4], [2-6]). Das unterste Ziel der Aufbereitung sollte bei der Schlacke-deponierung eine Ablagerung auf Deponien der Klasse II sein. Anzustreben ist jedoch die Ablagerungsmöglichkeit auf Deponien der Klasse I (Abb. 2.4).

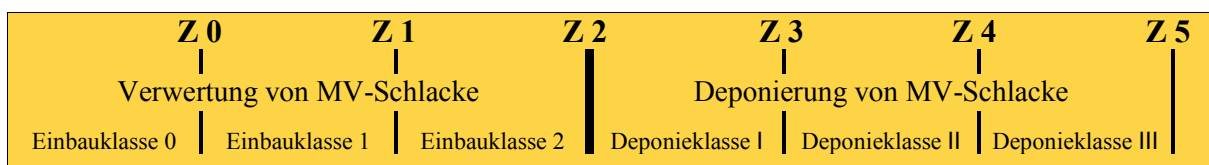


Abb. 2.4 Darstellung der Einbau- und Deponieklassen in Abhängigkeit der Zuordnungswerte ([2-6] S. 14)

Neben umweltrelevanten Anforderungen wurden auch erste bautechnische Empfehlungen zu MV-Schlackeeigenschaften definiert. Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen veröffentlichte Anforderungen an die Schlacken in ihrem Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau (M HMVA) [2-4]. Sie weist darin auf eine genügende Raumbeständigkeit und auf eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung sowie gegen Zertrümmerung hin. Im Merkblatt werden die Schlackeeigenschaften allgemein den jeweiligen Anforderungen für Gesteinskörnungen, Baustoffgemischen und Böden im Straßenbau gleichgesetzt, wobei teilweise schlackespezifische Anpassungen wie beispielsweise Grenzwerte und Methoden zur Bewertung der Raumbeständigkeit vorgenommen werden.

Bei einer Verwendung der Schlacke in geotechnischen Bauwerken sind über die genannten Schlackeeigenschaften hinaus weitere bodenmechanische Kenngrößen zu betrachten. Unter der Prämisse, dass MV-Schlacken als Ersatzbaustoff ein Äquivalent zum gewachsenen Boden bilden, werden die bauwerksspezifisch geforderten Bodeneigenschaften zugrunde gelegt. Speziell entworfene Einstufungskriterien für MV-Schlacken sind derzeit auf geotechnischem Gebiet nicht bekannt.

Eine Anpassung der Schlacke an die geotechnischen Erfordernisse ist, wie bereits schon im Zusammenhang mit ihren umweltrelevanten Anforderungen beschrieben, nur mit flexiblen Aufbereitungsmethoden möglich, die den unterschiedlichen Rohschlackezusammensetzungen und -konsistenzen angepasst werden können. Die Grundlagen für eine derartige Aufbereitung sind bereits vor bzw. während der Verbrennung zu schaffen. Je höher die Ausbrandgüte der Rohschlacke ist, das heißt, je geringer ihre Anteile an organischen und unverbrannten Restbestandteilen sind, umso qualitativ höher wird sich das Aufbereitungsergebnis einstellen. Konkretisiert wird die Aussage in der LAGA-Mitteilung 19 [2-5]. Im Anhang 6 der Mitteilung ist ein Glühverlust der Rohschlacke von kleiner 3,0 Masse-% festgelegt ([2-5] S. 14). Zielführend sind diesbezüglich, neben dem direkten Eingriff in den Verbrennungsprozess, Präventivmaßnahmen, wie etwa eine Zerkleinerung des Abfalls zur Vergrößerung seiner Reaktionsflächen oder eine Vorsortierung von Schad- und Wertstoffen vor der thermischen Behandlung ([1-2] S. 29).

In den meisten Fällen reichen die zuvor genannten Methoden nicht aus, um eine für die Weiterverwertung qualitativ ausreichende MV-Schlacke herzustellen, sodass im Anschluss an die Verbrennung zusätzliche Aufbereitungsverfahren notwendig werden. In erster Linie werden dafür mechanisch-physikalische Trennverfahren, Waschverfahren und Verfahren zur gezielten Schlackealterung genutzt. Seltener sind Schmelzverfahren in den Aufbereitungstechnologien anzutreffen.

Die mechanisch-physikalischen Trennverfahren dienen hauptsächlich der Abtrennung von Eisen- und Nichteisen-Metallen wie auch der von unverbrannten Bestandteilen. Für eine erfolgversprechende Abtrennung ist die Größe der Kornfraktionen entscheidend, die den Prozess durchlaufen. Enthält die Rohschlacke zu große Körnungen, umschließen diese das abzutrennende Gut bzw. verkleben mit diesem und verhindern so dessen Separation. Die aufzubereitenden Rohschlackekörnungen werden vorwiegend in Backenbrechern und Prallmühlen zerkleinert und enthalten Größtkörner bis zu 63 mm Durchmesser. Auch bei derartigen Partikelgrößen ist es nicht vollkommen auszuschließen, dass weiterhin Metalle und unverbrannte Bestandteile in der Schlacke verbleiben.

Neben dem Effekt, einen höheren Reinheitsgrad zu erzielen, vergrößert sich durch das Brechen der Schlacke auch die Oberfläche ihrer Partikel, wodurch ihr Alterungsverhalten begünstigt wird, was sich wiederum positiv auf ihre Raumbeständigkeit auswirkt.

Im Fall einer geotechnischen Verwendung wird mit dem Brechvorgang die Grundlage möglicher Körnungslinien geschaffen, sodass der Zerkleinerungsprozess nicht nur den Anforderungen darauffolgender Aufbereitungsschritte anzupassen ist, sondern auch einer potentiell geforderten Körnungslinie.

Für eine Rückgewinnung von ferromagnetischen Bestandteilen durchläuft die Schlacke in der Regel eine Magnetabscheidung. Die Separation von Nichteisen-Metallen wird durch in den Aufbereitungsprozess integrierte Förderbänder zur Handklaubung oder Wirbelstromabscheideanlagen realisiert, wobei letztere in der Aufbereitung nur vereinzelt vorkommen. Unverbrannte Schlackeinhalte wie Holz, Papier, Stoffreste und andere Leichtstoffanteile können beispielsweise durch Windsichter austragen werden, da ihre Dichten oft geringer sind, als die der verbrannten Schlackeanteile.

Verwendungsspezifische Körnungsbänder können unter Verwendung von Vibrations- oder Trommelsieben klassiert werden, wobei zuletzt genanntes Verfahren eine erhöhte Kornzertrümmerung nach sich zieht. Mit der Absiebung von Fraktionen größer 32 mm lassen sich in der Schlacke zusätzlich die Anteile unverbrannter und inerter Bestandteile sowie die von Metallen reduzieren, da diese Stoffe vermehrt mit der groben Körnung verschmolzen sind.

Im Anschluss an die mechanisch-physikalischen Aufbereitungsverfahren können leicht lösliche Bestandteile der Schlacke durch Waschen entzogen werden. In erster Linie reduzieren sich dabei die Chloridanteile der MV-Schlacke, die vorwiegend als leicht lösliches Natriumchlorid bzw. Kaliumchlorid vorliegen. Sulfate hingegen sind hauptsächlich als Calciumsulfat in der Schlacke enthalten, das ähnlich wie gebundene Schwermetalle im Waschvorgang kaum in Lösung zu bringen ist.

Ein nicht außer Acht zu lassender Effekt der Schlackewäsche ist die Abschlämmung von Feinfraktionen. Sie kann je nach bodenmechanischen und hydraulischen Anforderungen sowohl Vorteile wie auch Nachteile mit sich bringen. Aus dem Grund sind die Einflüsse von Waschverfahren auf geforderte Kornverteilungen prinzipiell zu prüfen.

Vorteilhaft wirkt sich die Befeuchtung der Schlacke während des Waschvorganges auf ihr späteres Alterungsverhalten aus, denn wie eine permanente Durchlüftung regt auch Feuchtigkeit die Alterungsprozesse an.

In der LAGA-Mitteilung 19 [2-5] wird die Alterung bei mietenförmiger Lagerung von MV-Schlacke zur Verbesserung der Volumenbeständigkeit und des Elutionsverhaltens für mindestens 3 Monate gefordert ([2-5] S. 5). Auf die Prozesse der Schlackealterung selbst wird im Folgenden (*Abschnitt 5.1.1 und Abschnitt 6.2*) näher eingegangen.

Sind durch die genannten Aufbereitungsverfahren die geforderten Schlackeeigenschaften hinsichtlich der Schadstoffmobilität nicht zu erreichen, so können die Elutionseigenschaften der MV-Schlacke durch ihre Einschmelzung erheblich verbessert werden. Während dieser Inertisierung wird aus der Schlacke bei 1300 bis 1700°C ein glasähnliches Granulat erzeugt, in dem keine unverbrannten Stoffe mehr enthalten sind und schwer flüchtige Metalle sowie Salze demobilisiert werden ([4-3] S. 616). Zu bodenmechanischen Kenngrößen des Granulats existieren bislang kaum Erfahrungswerte, was nicht zuletzt daran liegt, dass aufgrund seines sehr hohen Energiebedarfs das Schmelzverfahren nur selten eingesetzt wird. So kann sich der Bedarf an elektrischer Energie durch ein externes Schmelzverfahren gegenüber einer alleinigen Abfallverbrennung vervierfachen, wodurch letztlich die Stromgewinnung aus dem Restabfall um bis zu 400 kWh/t reduziert wird (*ebd.*).

2.4 MV-Schlacke als geotechnischer Ersatzbaustoff

Wird eine Verwendung von Schlacke als Ersatz konventioneller Böden auf geotechnischen Gebieten beabsichtigt, sind grundlegend zwei Bereiche zu beleuchten. Zum einen ist ihre geotechnische Eignung zu prüfen und zum anderen sind Umweltaspekte zu betrachten. Letztere Kriterien werden nach jetzigem Stand erfüllt, wenn die Müllverbrennungsschlacke unter definierten Bedingungen mit den im Abschnitt 2.3 beschriebenen Zuordnungswerten eingebaut wird und die Eluatgrenzwerte von Z 2 eingehalten werden ([2-5] S. 4).

Derzeit findet die MV-Schlacke im Verkehrswege- und Dammbau sowie als Füllmaterial in Ausgleichsschichten eine häufige geotechnische Anwendung. Auch wurde die Schlacke in geringfügigem Maße bereits zur Modellierung von Gründungspolstern unter Gebäuden verwendet. Den momentan überwiegenden Verwertungsanteil nimmt jedoch der Deponiebau ein. Unter dem Gesichtspunkt wird es mit zu erwartendem Rückgang des Deponiebaus in den kommenden Jahren umso dringender, die Möglichkeiten der Schlackeverwendung durch neue Verwertungswege weiter zu fächern, um auch zukünftig ein MV-Schlacke-Recycling zu ermöglichen.

Vielversprechende Verwertungschancen bieten dafür der Erd- und Grundbau, aber auch einhergehende Gebiete wie die Bergversatzsanierung oder die Untertageverfüllungen aufgrund ihres großen Erdstoffbedarfs. Vor einer Verwendung der Schlacke in diesen Bereichen ist ihr jedoch eine spezifische bautechnische Eignung zu examinieren, die in erster Linie auf bodenmechanischen Kenngrößen beruht. Gemeinhin müssen die geotechnischen Kennwerte denen des zu ersetzenden Bodens mindestens gleichgestellt sein bzw. den Ansprüchen der Baumaßnahmen genügen. Bisher wurden aus Mangel an Alternativen zur geotechnischen Bewertung der Schlacken Labor- und Feldversuche herangezogen, die sich bereits zur Kennwertbestimmung von Böden bewährt haben. Da es sich bei MV-Schlacke jedoch nicht um einen gewachsenen Boden handelt, sondern um ein anthropogenes bodenähnliches Material, muss anfangs davon ausgegangen werden, dass nicht alle Ergebnisse der Versuchsmethoden bedingungslos das bodenmechanische Verhalten der Schlacken in situ widerspiegeln. In jedem Fall ist zuvor zu beurteilen, inwieweit sich die Methoden zur Schlackeuntersuchung eignen. Beispielgebend begründet wird diese These durch partiell auftretende Veränderungen von geotechnisch relevanten Schlackeeigenschaften bereits während der Versuchsverläufe.

Eine wie für Böden übliche Übertragung von bodenmechanischen und hydraulischen Eigenschaften auf andere Chargen ist bei den Schlacken oft, trotz gleicher Korngrößenklassifikationen, nicht möglich, wofür insbesondere die heterogene Zusammensetzung der Inhaltsstoffe von Schlackekonglomeraten und die nicht einheitlich Festigkeiten der Schlackepartikel selbst maßgebend sind. Chemische Reaktionen mit Wasser aus dem Baugrundumfeld, deren Intensität vom Schlackealter abhängig ist, verursachen einerseits Verfestigungen und zum anderen Volumenzuwächse im Korngerüst. Die dabei auftretenden Kräfte sind durchaus in der Lage, Bauwerke zu schädigen. Unter Berücksichtigung der schwierig zu definierenden Einflüsse und der in Abbildung 2.5 dargelegten geotechnischen Unterschiede zwischen gewachsenem Boden und MV-Schlacke ist vor einer geotechnischen Anwendung der Schlacke zu bewerten, inwieweit normative Sicherheitszuschläge für etwaige erdstatische Berechnungen ausreichen.

	Gewachsener Boden	MV-Schlacke
Inhaltsstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Annähernd homogen • Mineralisch, teilweise organische Beimengungen • Chemisch reaktionsträge 	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogen • Organisch, anorganisch, mineralisch - Massenanteile sind abhängig vom Müllinput und vom Verbrennungs- bzw. Aufbereitungsregime • Altersabhängig chemisch reaktiv
Korngerüst	<ul style="list-style-type: none"> • Konstante Fraktionierung für gleiche Böden 	<ul style="list-style-type: none"> • Chargenabhängige Korngrößenverteilung
Dauerhaftigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Gleichbleibendes Langzeitverhalten bei konstanten Umweltbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Altersabhängige Raumbeständigkeit • Bis zu mehreren Jahren anhaltende Stoffumwandlungs- und Zersetzungsprozesse
Umweltverträglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Im Allgemeinen unbedenklich 	<ul style="list-style-type: none"> • Im Allgemeinen schadstoffbelastet - Die Umweltverträglichkeit ist zwingend nachzuweisen

Abb. 2.5 Geotechnisch relevante Unterschiede zwischen gewachsenem Boden und MV-Schlacke
(eigene Abbildung)

Gleichwohl verfügen MV-Schlacken über Merkmale, die sie zu einem Bodenersatz in der Geotechnik qualifizieren. Durch flexibel an die Schlackeinhomogenität anzupassende Untersuchungskonzepte entsteht die Möglichkeit, über geotechnische Parameter festzustellen, inwieweit maßgebende bauliche Anforderungen von der Schlacke oder ihren Gemischen mit Boden zu erbringen sind. Eine Erweiterung der Planungssicherheit würden grundlegende Festlegungen zur Schlackebeschaffenheit bringen. Erste Ansätze, die jedoch vorrangig Aspekte des Boden- und Grundwasserschutzes betreffen, wurden hierzu bereits erarbeitet. Bautechnische Anforderungen sind bis heute nur vereinzelt festgelegt, global formuliert und konzentrieren sich größtenteils auf den Straßenbaubereich.

Kapitel 3

Art der untersuchten Materialien

3.1 Grundlagen zur Auswahl der untersuchten MV-Schlacken und Böden

In der vorliegenden Arbeit werden bodenmechanische und hydraulische Analysen sowohl an MV-Schlacken als auch an Kiessanden und Gemischen aus beiden durchgeführt, auf deren Grundlage geotechnische Vergleiche zwischen MV-Schlacken und Böden ermöglicht und Wege einer besseren geotechnischen Schlackecharakterisierung eruiert werden.

Die MV-Schlacken durchlaufen generell einen Alterungsprozess, in dem chemische Um- und Neubildungen stattfinden. Ihre Reaktivität nimmt dabei mit fortschreitender Zeit ständig ab, wobei der zeitliche Ablauf der chemischen Reaktionen erheblichen Schwankungen unterliegt. Abhängig von den Lagerungsbedingungen und den qualitativen bzw. quantitativen Voraussetzungen der reaktiven Stoffen können die Prozesse der Alterung in wenigen Wochen abgeschlossen sein – aber auch bis zu mehrere Jahre anhalten.

Vor dem Hintergrund, potentielle geotechnische Veränderungen der Schlacken im Alterungsprozess erfassen zu können, wird nachfolgend eine mehrere Jahre alte Schlacke untersucht, deren Bodenkennwerte dann mit ausgewählten bodenmechanischen Eigenschaften einer nur fünf Wochen alten Schlacke verglichen werden.

Die bereits mehrere Jahre gealterte Schlacke wird in der Gegenüberstellung als eine für die geotechnische Verwendung repräsentative Schlacke angesehen. Sie hat die erfahrungsgemäß erforderliche Mindestalterung von drei Monaten weithin überstiegen und es ist davon auszugehen, dass ihre bauwerksschädigenden Prozesse weitestgehend abgeschlossen sind ([2-5] S. 5 und [2-3] S. 10). In den Versuchsergebnissen der fünf Wochen alten Schlacke hingegen wird der Einfluss einer noch ausgeprägten Reaktivität erwartet, sodass eventuelle Zusammenhänge zwischen Schlackealter und geotechnischer Eignung zu erkennen sind. Als Boden wurde ein Kiessand gewählt, der einem standardmäßigen Verfüll- bzw. Dammbaumaterial entspricht. Die Kornfraktionen des Kiessandes sind aus gewachsenen Kiesen und Sanden gewonnen worden. Zur Herstellung der Schlacke-Boden-Gemische wurden die beschriebenen MV-Schlacken und der Kiessand fraktioniert und, wie im Abschnitt 3.2.2 beschrieben, neu gemischt.

3.2 Aufbereitung der Probengemische

Die mehrere Jahre alte wie auch die fünf Wochen alte MV-Schlacke wurden vor der Lieferung in einer Aufbereitungsanlage gebrochen und weitestgehend von unverbrannten Rückständen sowie von Eisen- und Nichteisen-Metallen befreit. Die mineralischen Bestandteile wurden im Schlackegefüge belassen und im Brechvorgang mit zerkleinert. Durch Absieben der Körnung größer 32 mm entstanden die Lieferkörnungen von 0-32 mm.

Nach erster Inaugenscheinnahme der Schlacken fiel eine ausgeprägte Heterogenität auf, die in den Bildern 3.1 und 3.2 deutlich wird. Trotz ihrer Aufbereitung wurden in ihnen Metallanteile und unverbranntes Material festgestellt.



Bild 3.1 Im BigBag gelieferte MV-Schlacke (eigenes Foto)

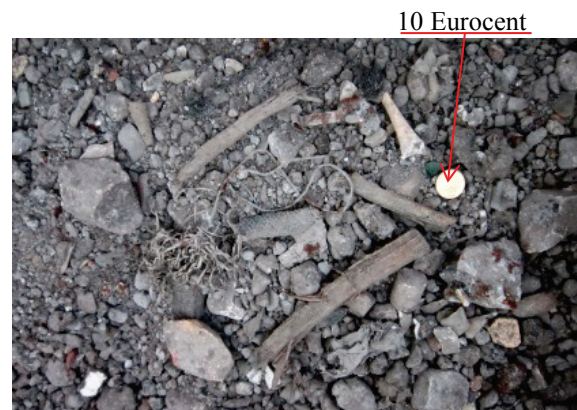


Bild 3.2 Unverbranntes Material in der MV-Schlacke (eigenes Foto)

In Anlehnung an das Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau ([2-4] S.12), wurden händisch Kornfraktionen größer 4,0 mm separiert und die in Tabelle 3.1 aufgeführte stoffliche Zusammensetzung festgestellt. Damit entspricht die gelieferte Schlacke den Vorgaben der Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, die einen Metallgehalt $\leq 5,0$ M-% und einen Gehalt an unverbranntem Material $\leq 0,5$ M-% festlegt ([2-3] S. 31).

Stoff- gruppe	MV-Schlacke	Metalle	Unverbranntes Material	Glas, Keramik	Mauerwerk, Ziegel, Gestein
Massen-%	74,1	3,8	0,5	15,8	5,8

Tab. 3.1 Durchschnittliche stoffliche Zusammensetzung der untersuchten MV-Schlacken (vgl. Anlage 1)

Auch im partiell vorhandenen Überkornanteil sind alle genannten Stoffgruppen vertreten. Sie wurden im Zug der Probenaufbereitung abgetrennt und nicht mit in die stoffliche Zusammensetzung einbezogen.

Die im Bild 3.3 gezeigten Metallbestandteile verdeutlichen beispielhaft die Größen der im Überkorn enthaltenen Partikel, die zuvor in der Aufbereitung abzutrennen waren.



Bild 3.3 Metalle aus dem Überkornanteil
(eigenes Foto)

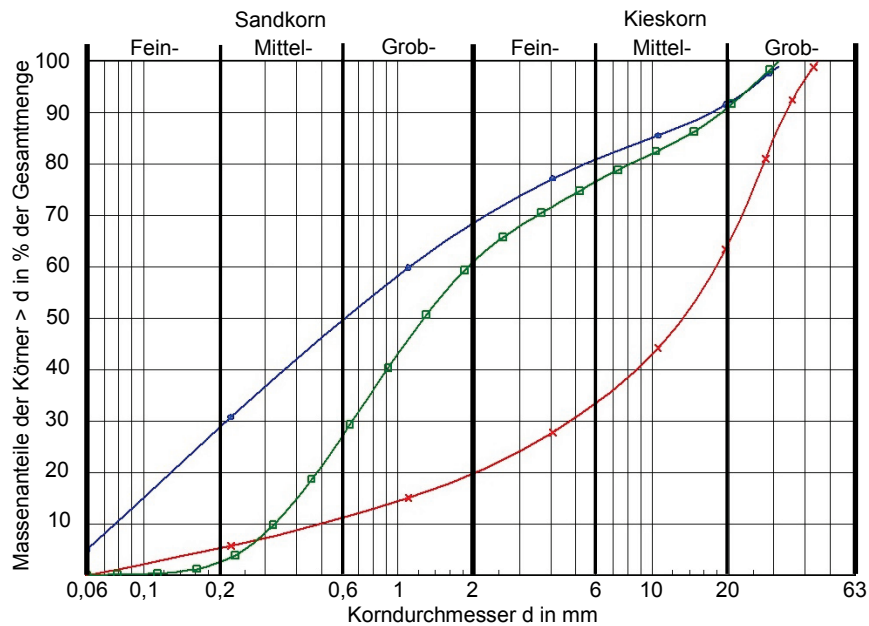
Zur Bestimmung der bodenmechanischen und hydraulischen Kenngrößen wurden sowohl die MV-Schlacken wie auch der Kiessand und die Schlacke-Kiessand-Gemische einer ausgewählten Körnungslinie (*Abschnitt 3.2.1*) angepasst. Dafür sind im ersten Schritt die Kornfraktionen im Standardsiebsatz getrennt worden, um anschließend die jeweiligen Korngrößenbereiche massenbezogen definiert zusammenmischen zu können.

3.2.1 Auswahl der Probenkörnungslinie

Die Kornverteilung eines Bodens beeinflusst maßgebend seine bodenmechanischen und hydraulischen Eigenschaften, wodurch es erforderlich ist, dass alle untersuchten Proben identische Körnungslinien besitzen, um ihre Kennwerte vergleichen und daraus Rückschlüsse auf geotechnische Einflüsse der Partikel selbst ziehen zu können.

Vor diesem Hintergrund wurden alle Proben an die in Abbildung 3.1 dargestellte definierte Kornverteilung angepasst. Die Grundlage der Körnungslinie bildet ein vorhandener Kiessand, dessen Kornverteilung so angeglichen wurde, dass sie die nach der TL SoB-StB [2-2] maßgeblichen Grenzen eines Bodengemisches von 0-32 mm zum Bau von Frostschuttschichten einhält ([2-2] S. 27). Ausgewählt wurden die Grenzbedingungen, da der Straßenbau ein Hauptanwendungsgebiet für MV-Schlacke bietet und die gelieferten Schlacken der Körnung 0-32 mm entsprechen.

Als unrealistisch erweist sich die genaue Anpassung der Körnungslinie im Ton- bzw. Schluffkornbereich. Aufgrund von Schlackepartikeln mit einer Dichte kleiner $1,0 \text{ g/cm}^3$ lässt sich die Sedimentationsanalyse zur Feststellung der Kornverteilung nicht anwenden und eine Separation der Körnungen ist hinsichtlich der benötigten Mengen nicht zu leisten. Die Ton- und Schlufffraktionen werden somit lediglich in ihrer Gesamtmasse berücksichtigt.



	Frostschuttschicht 0/32 mm nach TL SoB-StB/2004		Definierte Körnungslinie aller Proben 0/32 mm
	Linke Grenzlinie	Rechte Grenzlinie	
Bodenart (DIN 4022 T1)	S, u', fg', mg', gg'	gG, mg, fs', ms', gs', fg'	S, fg, mg', gg'
Bodengruppe (DIN EN ISO 14688-1)	cgr', mgr', fgr', si', Sa	fgr', csa', msa', fsa', mgr, cGr	cgr', mgr', fgr, Sa
Bodengruppe (DIN 18196)	SU	GW	SE
T / U / S / G [%]	- / 5,8 / 61,7 / 32,5	- / 0,2 / 19,1 / 80,8	- / 0,0 / 61,1 / 38,9
C_u / C_c	14,8 / 0,5	48,6 / 2,5	5,8 / 0,7
Kornkennzahl	0163	0028	0064

Abb. 3.1 Definierte Körnungslinie der untersuchten Proben 0/32 mm sowie obere und untere Grenzkörnungslinie nach TL SoB-StB/2004 (vgl. Anlage 2.1 - 2.2) ([3-2], [3-11], [3-20])

3.2.2 Zusammensetzung der Proben

In den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit werden insgesamt drei Materialarten analysiert, wobei es sich erstens um reine Müllverbrennungsschlacken, zweitens um Schlacke-Boden-Gemische und drittens um reinen Kiessand handelt.

Mit dem Ziel, die jeweiligen Einflüsse kiesiger bzw. sandiger Schlackepartikel selektieren zu können, wurden entsprechend Tabelle 3.2 sowohl bei der alten wie auch bei der jungen Schlacke zum einen die Korngrößen größer 2,0 mm durch Kies ausgetauscht und zum zweiten die Korngrößen kleiner gleich 4,0 mm durch Sand ersetzt. Die Kornverteilungen der Gemische entsprechen wiederum der definierten Körnungslinie 0-32 mm aus Abbildung 3.1.

Maschenweite [mm]	Definierte Körnungslinie aller Proben 0/32 mm Rückstand in %	Durch Boden ersetzte Schlackefraktionen in den Schlacke-Boden-Gemischen	
16,0	13,90	Kies > 2-32 mm (G)	MV- Schlacke > 4-32 mm (mG, gg*, fg)
8,0	5,84		
4,0	8,79		
2,0	8,53		
1,0	19,29	MV-Schlacke 0-2 mm (gS, ms*)	Sand 0-4 mm (gS, ms*, fg')
0,5	23,32		
0,25	17,84		
0,125	2,35		
0,063	0,11		
<0,063	0,04		

Tab. 3.2 Zusammensetzung der Schlacke-Boden-Gemische
(eigene Tabelle)

Die erforderlichen Massen jeder Kornfraktion werden unter Berücksichtigung der zugehörig ermittelten Korndichten ρ_s bestimmt:

- MV-Schlacke 4/32: $\rho_s = 2,55 \text{ g/cm}^3$
- MV-Schlacke 0/4: $\rho_s = 2,72 \text{ g/cm}^3$
- Kiessand 0/32: $\rho_s = 2,63 \text{ g/cm}^3$

(Anlage 5.1 - 5.2 und Abschnitt 4.2.2)

Beispiel:

In 10 kg Schlacke werden im Körnungsbereich >16-32 mm (= 13,90 M-% Schlacke)

$$0,139 \cdot 10 \text{ kg} = 1,39 \text{ kg} \quad \text{Schlacke durch} \quad 1,39 \text{ kg} \cdot \frac{2,55 \text{ g/cm}^3}{2,63 \text{ g/cm}^3} = 1,35 \text{ kg} \quad \text{Kies ersetzt,}$$

um volumenbezogen die Kornanteile replizieren zu können.

Kapitel 4

Geotechnische Bewertung

4.1 Versuchsprogramm

Die Klassifizierung des Abfallstoffes MV-Schlacke für geotechnische Einsatzzwecke wird durch eine Bestimmung eigenschaftsbildender Bodenkenngrößen vollzogen. Aufgrund einer in Deutschland fehlenden speziellen Normgebung mit entsprechenden Versuchen für Abfälle werden hierfür anerkannte boden- und hydromechanische Versuche durchgeführt. Die Herangehensweise wird weiterhin durch das Bestreben begründet, die MV-Schlacken für den Anwendungsbereich Geotechnik zu spezifizieren.

Da es sich bei MV-Schlacken jedoch nicht um einen Boden im Sinne der deutschen Grundbaunormen handelt, gilt es durch kritische Betrachtung der Ergebnisse und eine problemorientierte Auswertung von Versuchsbeobachtungen zu prüfen, ob die jeweiligen Untersuchungsmethoden auf die Schlacke anwendbar sind. Außerdem ist zu analysieren, inwieweit die Schlackekennwerte direkt mit denen von Primärbaustoffen wie z.B. Sand, Schotter oder Kies verglichen werden können. Als Grundlage dieser Bewertungen werden die MV-Schlacken und ihre Bodengemische nach geotechnischen Richtlinien in Anlehnung an die entsprechende Grundbaunormgebung folgenden Laborversuchen unterzogen:

- Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123:2011-04 [3-4]
- Bestimmung der Korndichte nach DIN 18124:2011-04 [3-5]
- Bestimmung des Glühverlustes nach DIN 18128:2002-12 [3-7]
- Bestimmung der Proctordichte nach E DIN 18127:2011-08 [3-6]
- Bestimmung des Setzungsverhaltens im eindimensionalen Kompressionsversuch nach E DIN 18135:2011-04 [3-9]
- Bestimmung der Scherfestigkeit nach DIN 18137-1:2010-07 [3-10]
- Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes nach DIN 18130-1:1998-05 [3-8]
- Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel nach DIN EN 1367-1:2007-06 [3-13]

Ergänzt werden die Versuche durch Untersuchungen zur Raumbeständigkeit in einer Triaxialzelle und Untersuchungen zum Materialverhalten von Geokunststoffen bzw. geotechnischen Stahlkonstruktionen bei MV-Schlacke-Kontakt im feuchten Milieu.

4.2 Versuchsergebnisse und Grenzen der Untersuchungsverfahren

4.2.1 Korngrößenverteilung

Versuchsbedingungen

Die Körnungslinien der gelieferten, mehrere Jahre bzw. fünf Wochen alten MV-Schlacken sind durch Trockensiebung entsprechend DIN 18123:2011-04 [3-4] ermittelt worden. Eine Analyse der Kornverteilung im Ton- bzw. Schluffkornbereich war nicht möglich. Hier konnte die Sedimentationsanalyse aufgrund von Schlackepartikeln mit einer Dichte kleiner $1,0 \text{ g/cm}^3$ und einer nicht vollkommen zu eliminierenden Kohäsion zwischen den Partikeln keine verwertbaren Ergebnisse liefern.

Versuchsergebnisse

Die Abbildungen 4.1-1 und 4.1-2 zeigen die Körnungslinien und deren Auswertungen der MV-Schlacken im Lieferzustand, die definierte Kornverteilung, auf die alle Proben anzupassen sind, sowie die linke und rechte Grenzkornverteilung nach TL SoB-StB [2-2].

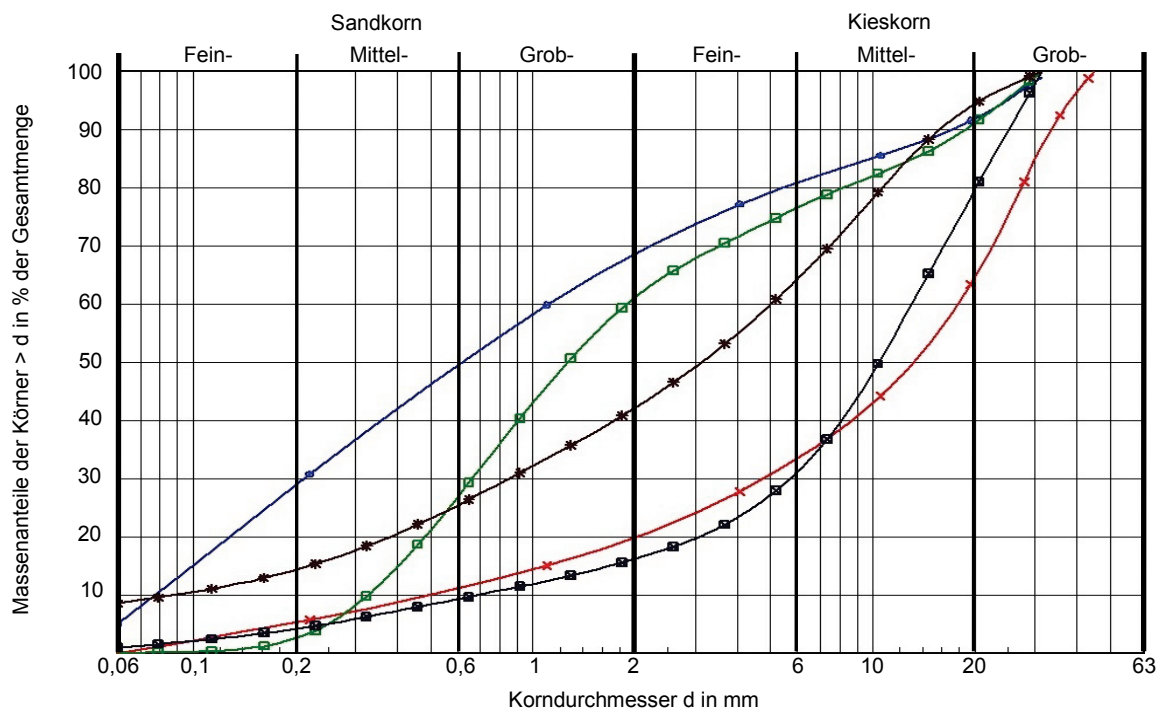


Abb. 4.1-1 Definierte Körnungslinien der untersuchten Proben 0/32 mm, Lieferkörnung der MV-Schlacken 0/32 mm sowie obere und untere Grenzkörnungslinie nach TL SoB-StB/2004 (vgl. Anlage 3.1 - 3.3) ([3-2], [3-11], [3-20])

	Frostschuttschicht 0/32 mm nach TL SoB-StB/2004		Definierte Körnungslinie aller Proben 0/32 mm
	Linke Grenzlinie	Rechte Grenzlinie	
Bodenart (DIN 4022 T1)	S, u', fg', mg', gg'	gG, mg, fs', ms', gs', fg'	S, fg, mg', gg'
Bodengruppe (DIN EN ISO 14688-1)	cgr', mgr', fgr', si', Sa	fgr', csa', msa', fsa', mgr, cGr	cgr', mgr', fgr, Sa
Bodengruppe (DIN 18196)	SU	GW	SE
T / U / S / G [%]	- / 5,8 / 61,7 / 32,5	- / 0,2 / 19,1 / 80,8	- / 0,0 / 61,1 / 38,9
C_u / C_c	14,8 / 0,5	48,6 / 2,5	5,8 / 0,7
Kornkennzahl	0163	0028	0064

	MV-Schlacke 0/32 mm	
	Mehrere Jahre alt	Fünf Wochen alt
Bodenart (DIN 4022 T1)	mG, gg, ms', gs', fg'	G, gs, u', fs', ms'
Bodengruppe (DIN EN ISO 14688-1)	fgr', csa', msa', cgr, mGr	msa', fsa', si', csa, Gr
Bodengruppe (DIN 18196)	GI	GU
T / U / S / G [%]	- / 1,1 / 15,1 / 83,8	- / 8,7 / 33,4 / 57,9
C_u / C_c	18,9 / 3,6	56,9 / 1,6
Kornkennzahl	0028	0136

Abb. 4.1-2 Auswertung der definierten Körnungslinien der untersuchten Proben 0/32 mm, Lieferkörnung der MV-Schlacken 0/32 mm sowie obere und untere Grenzkörnungslinie nach TL SoB-StB/2004 (vgl. Anlage 3.1 - 3.3) ([3-2], [3-11], [3-20])

Versuchsauswertung

Die Lieferkörnungen der beiden untersuchten MV-Schlacken unterscheiden sich in ihrer Fraktionierung erheblich. Auch wenn beide Körnungen hauptanteilig Kiese beinhalten, ist davon auszugehen, dass gerade die geringeren Sand- und Schluffanteile der älteren Schlacke entscheidend deren hydraulische Eigenschaften verändern. Böden mit dieser Körnungslinie erreichen beispielsweise annähernd einen k_f -Wert von $3,3 \cdot 10^{-3}$ m/s, wohingegen ein Boden mit einer zur fünf Wochen alten Schlacke äquivalenten Kornverteilung aufgrund der größeren Sand- und Schluffanteile als undurchlässiger abzuschätzen ist.

Bestimmung des k_f -Wertes für Böden nach der Methode von Beyer:

- Der Berechnung wurde die Kornverteilung der mehrere Jahre alten MV-Schlacke mit $d_{10} = 0,6911$ mm und $C_u = 18,9$ zugrunde gelegt.
- Gültigkeitsbedingungen der Methode von Beyer:
Gilt für Kiese und Sande mit $0,06 \leq d_{10} \leq 0,6$ mm und $1,0 \leq C_u \leq 20$
- Empirischer Gesteinsbeiwert $C = f(C_u) = 0,0064$
- $k_f = C \cdot (d_{10})^2 = 0,0064 \cdot 0,6911^2 = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Neben der Wasserdurchlässigkeit wird auch die Wasseraufnahme und das Wasserbindungsvermögen durch die Kornverteilung dahingehend bestimmt, dass einerseits die Kapillarität von der spezifischen Oberfläche des Feinkorns und andererseits die Hydratation von der tonmineralischen Aktivität abhängt. Hinzu kommt ein variierendes Porenvolumen mit Veränderung der Körnungslinie. Besonders bei hohen Feinkornanteilen wirken sich diese hydraulischen Eigenschaften kennzeichnend auf die Frostepfindlichkeit, das Setzungsverhalten und die Verdichtungsfähigkeit aus, wobei letztere zusätzlich durch die Ungleichförmigkeit der Kornverteilung beeinflusst wird.

Im direkten Vergleich der Lieferkörnungslinien beider MV-Schlacken ist zu erkennen, dass die fünf Wochen alte Schlacke, trotz eines gleichen Aufbereitungsregimes und einer grundsätzlich gleichen Lieferkörnung von 0-32 mm, einen höheren Sand- und Schluffkornanteil aufweist als die mehrere Jahre alte Schlacke. Neben Schwankungen in den Massenanteilen der Schlackeeinhaltsstoffe werden diese Unterschiede in den Kornfraktionen durch variierende Korndichten je Korngrößenbereich (*Abschnitt 4.2.2*) forciert.

Ausgehend von den beschriebenen Einflüssen der Kornverteilung auf die geotechnischen Eigenschaften ist ein Vergleich der charakterisierenden Kennwerte nur möglich, wenn alle Proben einer Körnungslinie entsprechen.

Hinsichtlich einer Anwendung der Schlacke in der Baupraxis zeigt sich anhand dieser Resultate, dass der Ansatz einheitlicher Kennwerte für Schlacken gleicher Kornbänder nicht bedingungslos möglich ist.

4.2.2 Korndichte

Versuchsbedingungen

Untersucht wurden sowohl mehrere Jahre alte wie auch fünf Wochen alte MV-Schlacken in den Kornfraktionen 0-4 mm, >4-32 mm und 0-32 mm sowie als Vergleichsmaterial mit gleicher Körnungslinie Sande 0-4 mm und Kiese >4-32 mm. Alle Schlackeproben wurden aus der jeweiligen BigBag-Gesamtprobe 0-32 mm gewonnen und an die definierte Probenkörnungslinie angepasst. Die beprobten Schlacke- und Bodenfraktionen 0-4 mm und >4-32 mm entstanden aus der definierten Korngrößenverteilung 0-32 mm durch Absieben der größeren bzw. kleineren Kornanteile. Abhängig vom Größtkorn wurden die Proben bis 4,0 mm Korngröße im 100 ml – Pyknometer mit Thermometer und Seitenkapillare und die Proben bis 32,0 mm Korngröße im 1000 ml – Kapillarpyknometer untersucht.

Versuchsergebnisse

Die Tabelle 4.1 zeigt die mittleren Korndichten der MV-Schlacken-Kornfraktionen 0-32 mm, >4-32 mm und 0-4 mm sowie die der Kiessand-Kornfraktionen >4-32 mm und 0-4 mm.

Korndichte ρ_s		
MV-Schlacke 0-32 mm	Mehrere Jahre alt	Fünf Wochen alt
Standardabweichung	0,0225 g/cm³	0,0201 g/cm³
Relative Streuung	0,8795 %	0,7907 %
Jeweiliger Mittelwert	2,56 g/cm³	2,54 g/cm³
Gesamt-Mittelwert	2,55 g/cm³	
MV-Schlacke >4-32 mm	Mehrere Jahre alt	Fünf Wochen alt
Standardabweichung	0,0151 g/cm³	0,0151 g/cm³
Relative Streuung	0,5921 %	0,5960 %
Jeweiliger Mittelwert	2,56 g/cm³	2,54 g/cm³
Gesamt-Mittelwert	2,55 g/cm³	
MV-Schlacke 0-4 mm	Mehrere Jahre alt	Fünf Wochen alt
Standardabweichung	0,0109 g/cm³	0,0099 g/cm³
Relative Streuung	0,3985 %	0,3653 %
Jeweiliger Mittelwert	2,72 g/cm³	2,71 g/cm³
Gesamt-Mittelwert	2,72 g/cm³	
Kies >4-32 mm		
Standardabweichung	0,0049 g/cm³	
Relative Streuung	0,1882 %	
Mittelwert	2,63 g/cm³	
Sand 0-4 mm		
Standardabweichung	0,0017 g/cm³	
Relative Streuung	0,0634 %	
Mittelwert	2,63 g/cm³	

Tab. 4.1 Versuchsergebnisse Korndichtebestimmung (vgl. Anlage 5.1 - 5.2)

Versuchsauswertung

Die Standardabweichung bzw. die relative Streuung der Schlackekorndichten erreichen in der Kornfraktionen $>4-32$ mm etwa die dreifachen Werte derjenigen von Kies und in der Kornfraktionen $0-4$ mm sogar annähernd die sechsfachen Werte in Bezug auf den Sand. Die anfangs visuell festgestellte Inhomogenität der Schlacke bestätigt sich somit durch die erheblich größeren Korndichtestreuungen. Im Korngrößenbereich größer $4,0$ mm lassen sich sowohl beim Boden wie auch bei der Schlacke die größeren Variationen der Einzelwerte bezüglich zu denen der kleineren Korngrößen grundsätzlich auf die Untersuchung dieser Proben im 1000 ml – Kapillarpiknometer zurückführen.

Der Korndichtenanstieg zwischen den Schlackeproben $>4-32$ mm bzw. $0-32$ und $0-4$ mm um $0,17$ g/cm³ ist durch einen wachsenden Anteil an geschlossenen Porenräumen mit steigender Korngröße erklären. Wird grundlegend von einer höheren Festsubstanzdichte der Schlackekörner als derjenigen der Bodenkörner ausgegangen, so ergeben sich auch die im Vergleich zum Sand größeren und im Vergleich zum Kies geringeren Schlackekorndichten aufgrund des anwachsenden eingeschlossenen Luftvolumens mit steigendem Korndurchmesser.

Die Schlackegefüge mit den Körnungsbändern $0-32$ mm und $>4-32$ mm besitzen die gleiche Korndichte, was bedeutet, dass die Dichten der Korngrößen größer $4,0$ mm das Gesamtgefüge dominieren.

Der untersuchte Kiessand weist über den gesamten Korngrößenbereich eine einheitliche Korndichte von $2,63$ g/cm³ auf, die auch aufgrund von Erfahrungswerten für Sande und Kiese als plausibel einzustufen ist.

4.2.3 Glühverlust

Versuchsbedingungen

Die Mindestprobenmasse wurde nach DIN 18128:2002-12 [3-7] anhand der vorliegenden Bodenart bestimmt. Sie wurde mit 50 g auf einen Wert festgelegt, der zwischen Sanden und kiesigen Sanden liegt, da die Norm für MV-Schlacken keine explizite Zuordnung vorsieht. Die Schlackeproben $0-32$ mm wurden im Muffelofen bei 550°C bis zur Massenkonstanz geglüht.

Versuchsergebnisse

Die Glühverluste der mehrere Jahre alten und fünf Wochen alten Schlacke wurden jeweils im Körnungsband 0/32 mm ermittelt. Die entsprechenden Mittelwerte sind in der Tabelle 4.2 dargestellt.

Glühverlust V_{gl}		
MV-Schlacke 0-32 mm	Mehrere Jahre alt	Fünf Wochen alt
Standardabweichung	1,1989 %	0,8010 %
Relative Streuung	21,2702 %	14,7280 %
Mittelwert	5,64 %	5,44 %

Tab. 4.2 Versuchsergebnisse Glühverlust (vgl. Anlage 6)

Versuchsauswertung

In der Bodenmechanik zielt der Versuch darauf ab, den im Boden enthaltenen Kohlenstoff zu Kohlendioxid oxidieren zu lassen, das dann aus der Bodenprobe entweicht. Dabei wird zugrunde gelegt, dass der Kohlenstoff ausschließlich in den organischen Bodenbestandteilen enthalten ist. Bezüglich der MV-Schlacken muss angenommen werden, dass sich im Zuge des Glühens auch Massenverluste ergeben, die nicht auf organische Bestandteile zurückzuführen sind und das Versuchsergebnis verfälschen. Die Quantität dieser ergebnisverfälschenden Substanzen konnte nicht gesondert eruiert werden, sodass nur die Möglichkeit bleibt, die Versuchsergebnisse als Maximalwerte organischer Anteile zu deuten.

Das Verformungsverhalten aufgrund sich zersetzender organischer Bestandteile ist demnach bei Schlacken nur näherungsweise zu bestimmen und erreicht nicht die Präzision, wie sie bei Böden anhand eines ermittelten Glühverlustes möglich ist.

Nichtbindige Böden erreichen mit über 3,0 % und bindige Böden mit über 5,0 % Massenanteil organischer Bestandteile die Grenze, ab der sie organischen Bodengruppen zuzuordnen sind ([3-1] S. 36). Darauf Bezugnehmend sind die untersuchten Schlacken in die Bodengruppe OH nach DIN 18196:2011-05 [3-11] einzustufen.

Im Vergleich zu beispielsweise Mutterboden, der ebenso die Kriterien eines OH-Bodens erfüllen kann, qualifizieren sich die Schlacken in ihrer Zusammensetzung eindeutig als nicht gleichartig und so auch als nicht bodengleich. Bekräftigt wird diese Charakteristik der Schlacke durch die ausgeprägten relativen Streuungen und Standardabweichungen ihrer Glühverluste, in denen sich die heterogene Schlackezusammensetzung widerspiegelt.

Wird der Glühverlust aus abfallwirtschaftlicher Sicht beurteilt, dient er im Zuge der Entsorgung von MV-Schlacke als Kriterium für die Zuordnung zu einzelnen Deponieklassen. In diesem Fall wird er entsprechend DIN EN 12879:2001-02 [3-18] bestimmt, wobei sich die Glühtemperatur zur DIN 18128:2002-12 [3-7] nicht unterscheidet.

Die Deponieverordnung [1-4] beschränkt den Glühverlust für die Deponieklasse I auf 3,0 M-% und auf 5,0 M-% für die Deponieklasse II ([1-4] S. 39). Beide Grenzwerte werden bei einer Analyse entsprechend der Grundbaunormgebung von den untersuchten Schlacken nicht eingehalten. Zusätzlich erfüllen sie auch nicht den Grenzwert für die Entsorgung von MV-Rohschlacke der LAGA-Mitteilung 19 [2-5] von weniger als 3 M-% ([2-5] S. 14).

4.2.4 Proctordichte

Versuchsbedingungen

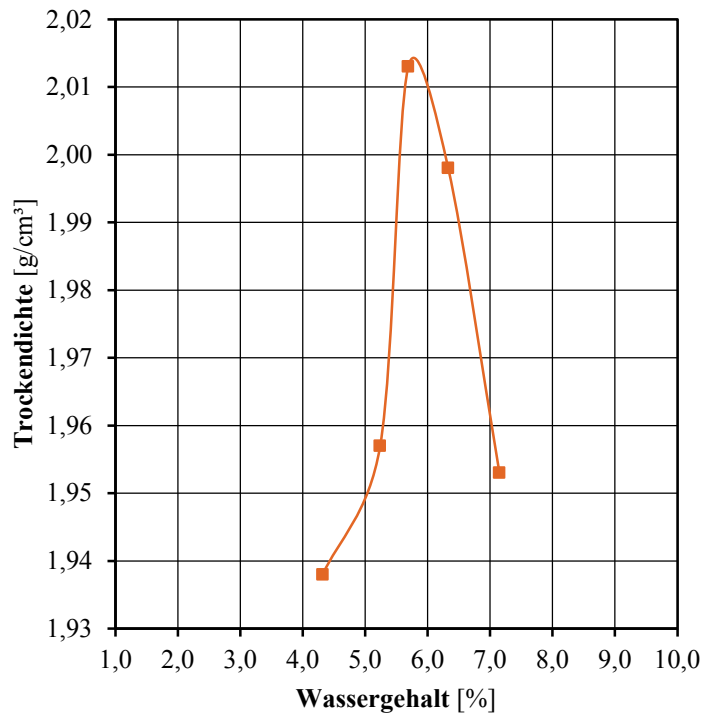
Im Proctorversuch wurden sowohl die MV-Schlacken, wie auch der Kiessand und die definierten Gemische aus Boden und Schlacke untersucht. Alle Proben entsprechen der festgelegten Körnungsverteilung 0-32 mm (*Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2*).

Wie für ein Größtkorn von 32 mm in der E DIN 18127:2011-08 [3-6] festgelegt, wurden die Probenmaterialien im Proctortopf B ($h = 125$ mm, $d = 150$ mm) verdichtet. Der Wassergehalt wurde in Anlehnung an die DIN 18121-1:1998-04 [3-3] durch Ofentrocknung bestimmt.

Versuchsergebnisse

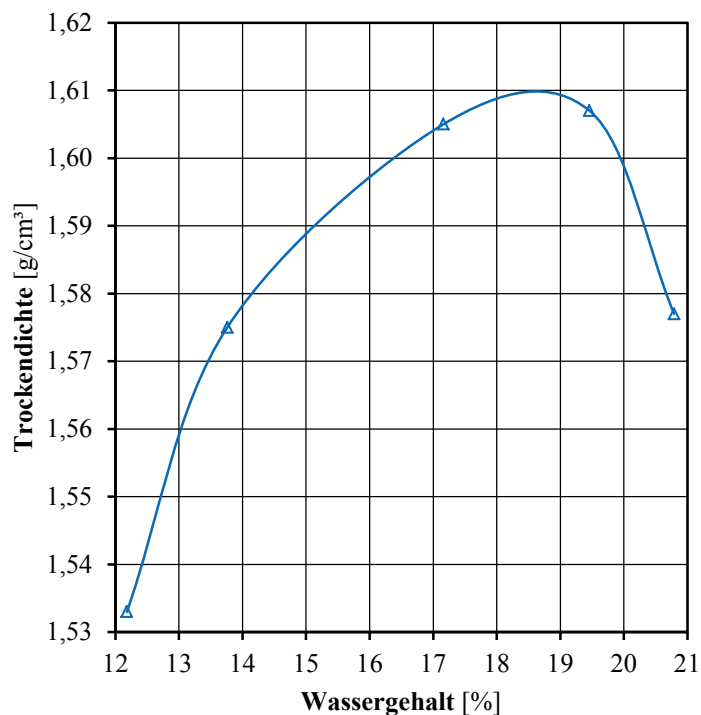
In den Abbildungen 4.2 bis 4.8 werden die Proctorkurven der untersuchten Stoffgemische veranschaulicht. Zugehörig zu den Diagrammen sind die entsprechenden Wertepaare der Einzelversuche tabellarisch aufgeführt. Die jeweilig ermittelte Proctordichte des untersuchten Stoffes wird zusammen mit dem optimalen Wassergehalt dargestellt. Aus ihr werden die 97 % und 95 % Verdichtungsgrade errechnet. Liegen diese im Bereich der ermittelten Proctorkurven, so werden die entsprechenden minimalen und maximalen Wassergehalte angegeben. In Abbildungen 4.2 wird der Proctorversuch des reinen Kiessandes gezeigt. Die Abbildungen 4.3 bis 4.5 dokumentieren die Versuche der mehrere Jahre alten MV-Schlacke und die Abbildungen 4.6 bis 4.8 diejenigen der fünf Wochen alten MV-Schlacke, wobei jeweils die erste Abbildung die reine Schlacke, die zweite Abbildung das Schlacke-Kies-Gemisch und die dritte Abbildung das Schlacke-Sand-Gemisch dokumentiert.

Aus Abbildung 4.2 und 4.3 ist ersichtlich, dass die Proctordichte der reinen mehrere Jahre alten MV-Schlacke im Vergleich zum Kiessand mit gleicher Kornverteilung bei einem vielfach höheren Wassergehalt erheblich niedriger ausfällt.



Kiessand		
Probe	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm³]
1	4,32	1,938
2	5,24	1,957
3	5,69	2,013
4	6,33	1,998
5	7,15	1,953
100 % der Proctordichte		$\rho_{Pr} = 2,016 \text{ g/cm}^3$
Bei optimalem Wassergehalt		$w_{Pr} = 5,8 \%$
97,0 % der Proctordichte		$\rho_{97} = 1,956 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{97} = 5,2 / 7,1 \%$
95,0 % der Proctordichte		$\rho_{95} = 1,915 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{95} = - / - \%$

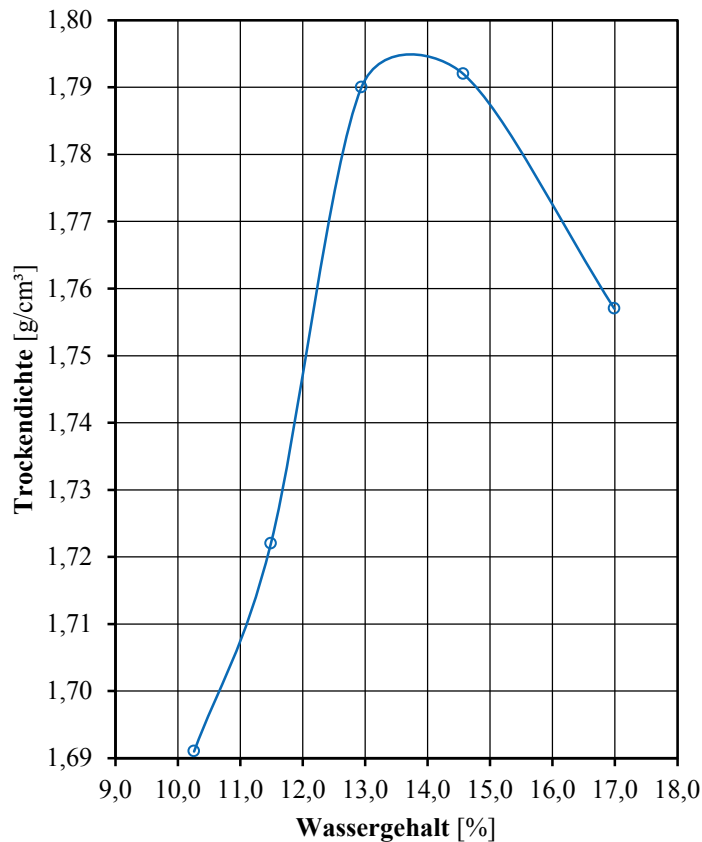
Abb. 4.2 Proctorversuch des Kiessandes (vgl. Anlage 7.1 - 7.2)



MV-Schlacke Mehrere Jahre alt		
Probe	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm³]
1	12,18	1,533
2	13,76	1,575
3	17,16	1,605
4	19,46	1,607
5	20,79	1,577
100 % der Proctordichte		$\rho_{Pr} = 1,610 \text{ g/cm}^3$
Bei optimalem Wassergehalt		$w_{Pr} = 18,6 \%$
97,0 % der Proctordichte		$\rho_{97} = 1,562 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{97} = 13,0 / - \%$
95,0 % der Proctordichte		$\rho_{95} = 1,530 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{95} = - / - \%$

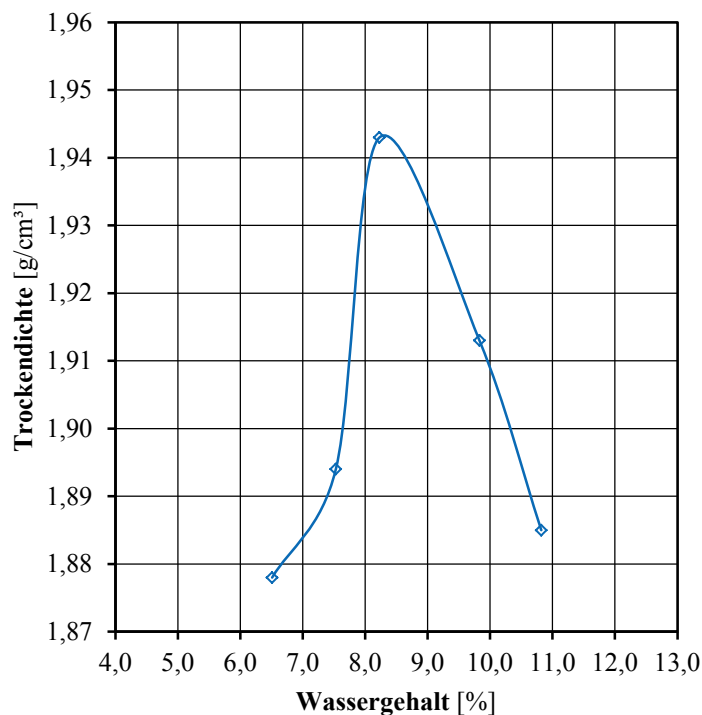
Abb. 4.3 Proctorversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke (vgl. Anlage 8.1 - 8.2)

Mit dem Austausch von Schlackekörnern durch Bodenpartikel nähern sich wie Abbildung 4.4 und 4.5 zeigen Proctordichte und Wassergehalt der Schlacke an die des Kiessandes an.



MV-Schlacke-Kies-Gemisch Mehrere Jahre alt		
Probe	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm³]
1	10,26	1,691
2	11,49	1,722
3	12,94	1,790
4	14,57	1,792
5	16,99	1,757
100 % der Proctordichte		$\rho_{Pr} = 1,799 \text{ g/cm}^3$
Bei optimalem Wassergehalt		$w_{Pr} = 13,7 \%$
97,0 % der Proctordichte		$\rho_{97} = 1,745 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{97} = 12,0 / - \%$
95,0 % der Proctordichte		$\rho_{95} = 1,709 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{95} = 11,1 / - \%$

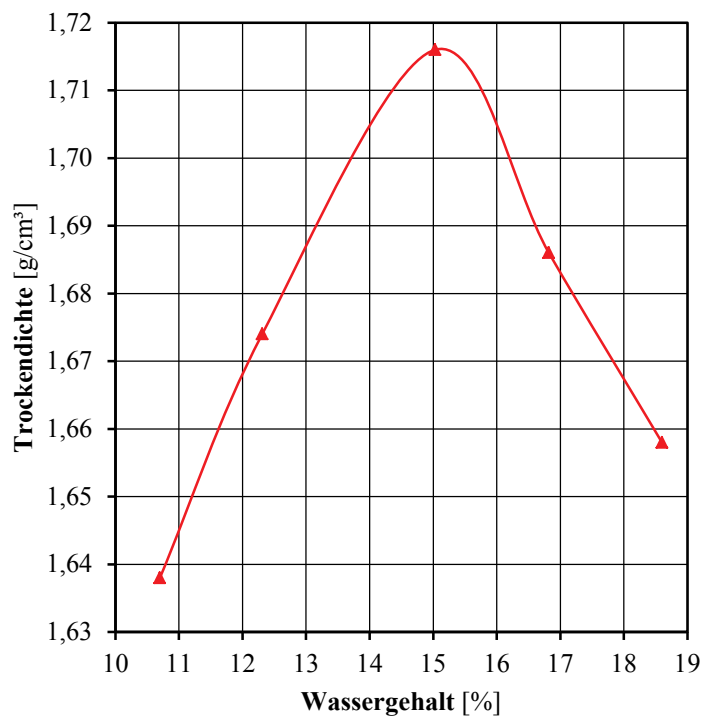
Abb. 4.4 Proctorversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Kies (vgl. Anlage 9.1 - 9.2)



MV-Schlacke-Sand-Gemisch Mehrere Jahre alt		
Probe	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm³]
1	6,51	1,878
2	7,53	1,894
3	8,23	1,943
4	9,83	1,913
5	10,82	1,885
100 % der Proctordichte		$\rho_{Pr} = 1,943 \text{ g/cm}^3$
Bei optimalem Wassergehalt		$w_{Pr} = 8,4 \%$
97,0 % der Proctordichte		$\rho_{97} = 1,885 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{97} = 7,4 / 10,8 \%$
95,0 % der Proctordichte		$\rho_{95} = 1,846 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{95} = - / - \%$

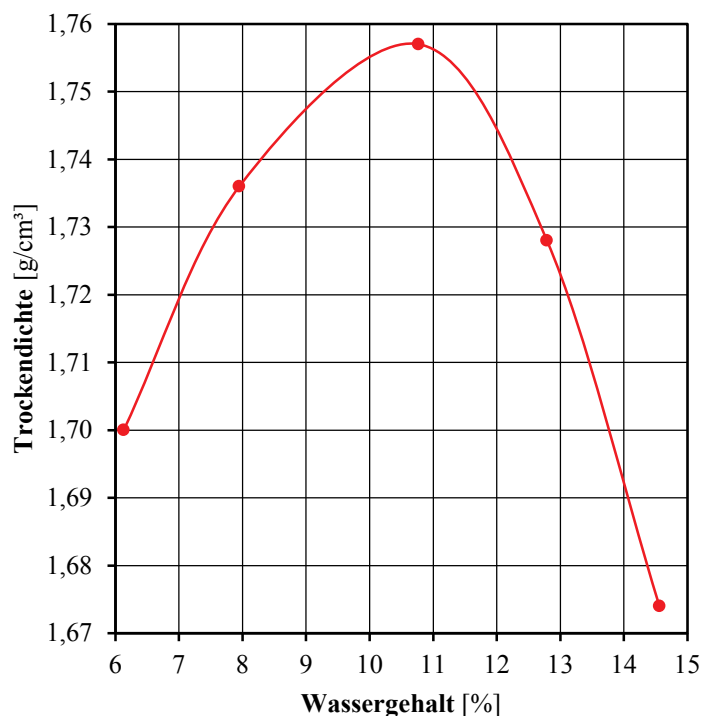
Abb. 4.5 Proctorversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Sand (vgl. Anlage 10.1 - 10.2)

Wie bei der alten MV-Schlacke ist nach Abbildung 4.6 auch die Proctordichte der reinen fünf Wochen alten MV-Schlacke im Vergleich zum Kiessand bei höherem Wassergehalt niedriger. Auch lassen sich, wie in Abbildung 4.7 und 4.8 ersichtlich ist, mit dem Mischen von junger MV-Schlacke mit Boden die Proctordichten steigern.



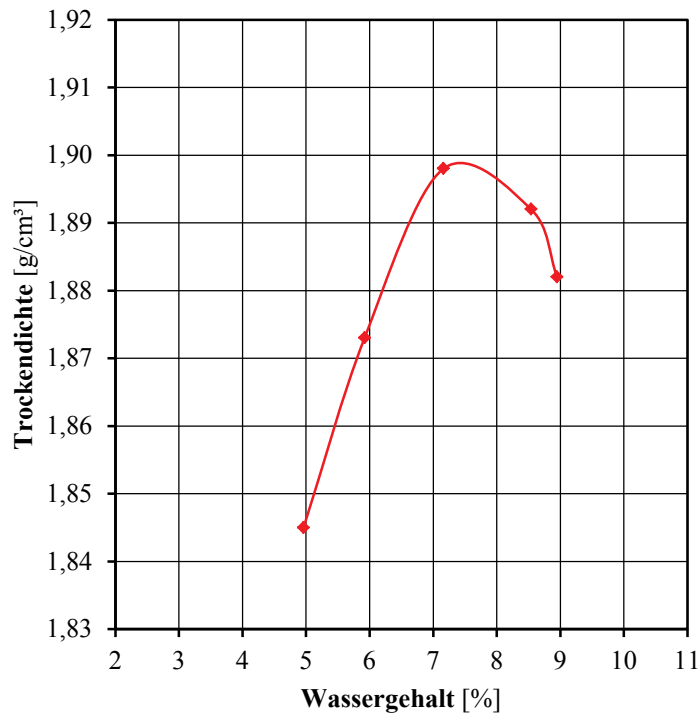
MV-Schlacke Fünf Wochen alt		
Probe	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm³]
1	10,70	1,638
2	12,31	1,674
3	15,03	1,716
4	16,82	1,686
5	18,60	1,658
100 % der Proctordichte		$\rho_{Pr} = 1,716 \text{ g/cm}^3$
Bei optimalem Wassergehalt		$w_{Pr} = 15,2 \%$
97,0 % der Proctordichte		$\rho_{97} = 1,665 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{97} = 11,9 / 18,1 \%$
95,0 % der Proctordichte		$\rho_{95} = 1,630 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{95} = - / - \%$

Abb. 4.6 Proctorversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke (vgl. Anlage 11.1 - 11.2)



MV-Schlacke-Kies-Gemisch Fünf Wochen alt		
Probe	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm³]
1	6,13	1,700
2	7,95	1,736
3	10,77	1,757
4	12,79	1,728
5	14,56	1,674
100 % der Proctordichte		$\rho_{Pr} = 1,757 \text{ g/cm}^3$
Bei optimalem Wassergehalt		$w_{Pr} = 10,6 \%$
97,0 % der Proctordichte		$\rho_{97} = 1,704 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{97} = 6,3 / 13,6 \%$
95,0 % der Proctordichte		$\rho_{95} = 1,669 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{95} = - / - \%$

Abb. 4.7 Proctorversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Kies (vgl. Anlage 12.1 - 12.2)



MV-Schlacke-Sand-Gemisch Fünf Wochen alt		
Probe	Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm³]
1	4,96	1,845
2	5,92	1,873
3	7,16	1,898
4	8,54	1,892
5	8,95	1,882
100 % der Proctordichte		$\rho_{Pr} = 1,899 \text{ g/cm}^3$
Bei optimalem Wassergehalt		$w_{Pr} = 7,5 \%$
97,0 % der Proctordichte		$\rho_{97} = 1,842 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{97} = - / - \%$
95,0 % der Proctordichte		$\rho_{95} = 1,804 \text{ g/cm}^3$
Bei min. / max. Wassergehalt		$w_{95} = - / - \%$

Abb. 4.8 Proctorversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Sand (vgl. Anlage 13.1 - 13.2)

Versuchsauswertung

Deutliche Annäherungen des Schlacke-Sand-Gemisches in der Proctordichte, im optimalen Wassergehalt bzw. im Porenanteil an die bezeichnenden Werte des Kiessandes zeigen, dass das Verdichtungsverhalten der MV-Schlacke maßgeblich von ihren Sand-, Fein- und Feinstanteilen beeinflusst wird. Die im Zuge von Vorversuchen aufgestellte Hypothese, dass sich die gegenüber einem Kiessand geringeren Proctordichten der Schlacke aufgrund einer erhöhten Reibung zwischen den Partikeln im Grobkornbereich und ihr mögliches Verhaken untereinander ergeben, wird somit widerlegt. Vielmehr zeigt sich im korndichteabhängigen Vergleich, dass sich die offenen Porenräume im Gefüge aufgrund des volumenäquivalenten Austausches von Schlackepartikeln der Kornfraktionen 0-4 mm durch Sandkörnungen um bis zu 11 % gegenüber reiner Schlacke verringern. Die Porenanteile werden nur noch im reinen Kiessand selbst unterschritten, der einen ca. 13 % geringeren Porenanteil als MV-Schlacke aufweist. Im MV-Schlacke-Kies-Gemisch hingegen konnte der Anteil offener Poren nur um bis zu annähernd 4 % reduziert werden. Die Porenanteile aller Proben sind in Tabelle 4.3 zusammenfassend dargestellt.

Für die Bewertung der Verdichtung von MV-Schlacken übernimmt ihr Porenanteil als Vergleichswert eine bestimmende Rolle. Im Gegensatz zur Proctordichte werden durch ihn auch differierende Korndichten in den MV-Schlacken und in den Schlacke-Boden-Gemischen berücksichtigt. Für zuletzt genannte werden die Korndichten entsprechend Abbildung 4.9 in Abhängigkeit von den Schlacke- bzw. Bodenanteilen im Gemisch ermittelt.

$$\text{Porenanteil: } n = 1 - \frac{\rho_{Pr}}{\rho_s} \quad [-]$$

Probenart	MV-Schlacke		MV-Schlacke-Kies-Gemisch		MV-Schlacke-Sand-Gemisch		Kiessand
	Fünf Wochen	Mehrere Jahre	Fünf Wochen	Mehrere Jahre	Fünf Wochen	Mehrere Jahre	
ρ_{Pr} [g/cm³]	1,716	1,610	1,757	1,799	1,899	1,943	2,016
w_{Pr} [%]	15,2	18,6	10,6	13,7	7,5	8,4	5,8
ρ_s [g/cm³]	2,55	2,55	2,69	2,69	2,61	2,61	2,63
n [-]	0,327	0,369	0,347	0,331	0,272	0,256	0,233

Tab. 4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Proctorversuche (eigene Tabelle)

<u>Korndichte in Abhängigkeit von der Fraktionierung</u>			
MV-Schlacke-Kies-Gemisch:			
Schlackeanteil 0-2 mm:	62,94 %	$\rho_{s, Schlacke} = 2,72 \text{ g/cm}^3$	
Kiesanteil >2-32 mm:	37,06 %	$\rho_{s, Kies} = 2,63 \text{ g/cm}^3$	
$\rho_{s \text{ Gemisch}} = 2,72 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,6294 + 2,63 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,3706 = \underline{\underline{2,69 \text{ g/cm}^3}}$			
MV-Schlacke-Sand-Gemisch:			
Schlackeanteil > 4-32 mm:	28,53 %	$\rho_{s, Schlacke} = 2,55 \text{ g/cm}^3$	
Sandanteil 0-4 mm:	71,47 %	$\rho_{s, Sand} = 2,63 \text{ g/cm}^3$	
$\rho_{s \text{ Gemisch}} = 2,55 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,2853 + 2,63 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,7147 = \underline{\underline{2,61 \text{ g/cm}^3}}$			

Abb. 4.9 Abhängigkeit der Probenkorndichte vom Mischungsverhältnis zwischen MV-Schlacke und Boden (eigene Abbildung)

Mit einer Reduzierung der offenporigen Anteile im Gefüge geht auch eine Verringerung des aufnehmbaren Wassers einher, was einen niedrigeren optimalen Wassergehalt zur Folge hat. Werden diesbezüglich die mehrere Jahre alte MV-Schlacke und deren Gemische mit Kies und Sand betrachtet, ist, wie in Abbildung 4.10 erkennbar, sogar ein nahezu geradliniger Anstieg des Wassergehaltes mit wachsendem Porenanteil festzustellen.

Im Fall der Schlacke-Boden-Gemische mit fünf Wochen alter MV-Schlacke sind geringere Wassergehalte bei höheren Porenanteilen gegenüber denen der Gemische mit mehrerer Jahre alter Schlacke signifikant. Ein Vergleich der Wassergehalte in Abbildung 4.10 von reiner alter und reiner junger Schlacke zeigt ebenso diese Wassergehaltsdifferenzen, wobei hier der Porenanteil der jungen Schlacke niedriger ausfällt. Der Grund für derartige Unterschiede im Wassergehalt lässt sich aus der für junge Schlacke erhöhten chemischen Reaktivität schließen, die das Wasser dauerhaft im Gefüge bindet. Die wasserbindenden Schlackereaktionen werden in ihrer Existenz dadurch bekräftigt, dass die durch Ofentrocknung ermittelten Wassergehalte geringer ausfallen als jene, die vor der Verdichtung in den Einzelproben definiert eingestellt wurden.

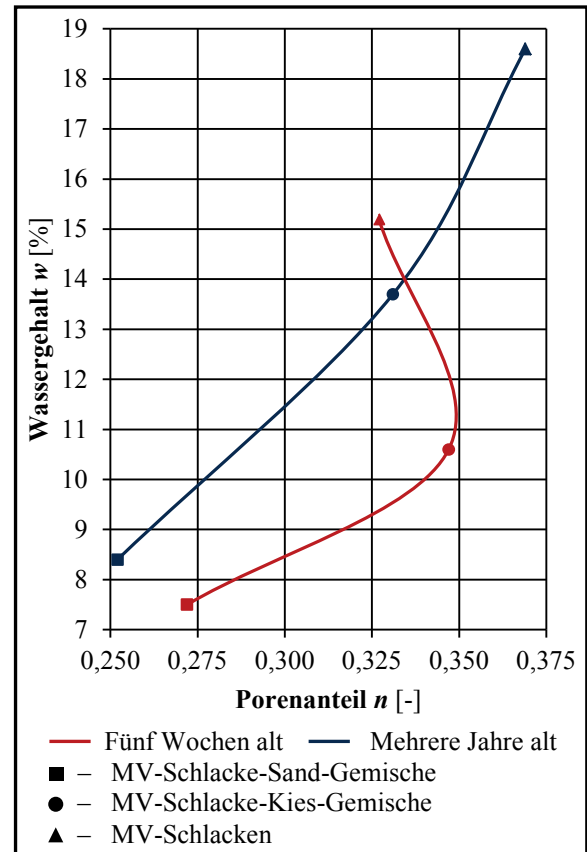


Abb. 4.10 Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Porenanteil bei MV-Schlacke und deren Gemischen mit Kies und Sand (eigene Abbildung)

In Tabelle 4.4 sind beispielhaft vor der Verdichtung im Proctortopf definierte Wassergehalte von Einzelproben der fünf Wochen alten Schlacke entsprechend den Gehalten an Wasser gegenübergestellt, die in den Proben nach der Verdichtung bestimmt worden sind.

Wassergehalte im Proctorversuch					
Einzelprobe	1	2	3	4	5
Definierter Wassergehalt vor der Verdichtung [%]	12	14	16	18	20
Wassergehalt bestimmt durch Ofentrocknung [%]	10,70	12,31	15,03	16,82	18,60
Wassergehaltsdifferenz [%]	1,30	1,69	0,97	1,18	1,40

Tab. 4.4 Wassergehalte von Einzelproben der fünf Wochen alten MV-Schlacke vor und nach der Verdichtung im Proctorversuch (eigene Tabelle)

Der geringere Porenanteil reiner, fünf Wochen alter Schlacke gegenüber ihrem Gemisch mit Kies lässt sich auf die Heterogenität des Schlackematerials bzw. auf die Kornzertrümmerung im Verdichtungsprozess zurückführen.

Neben der chemischen Bindung von Wasser war in den Proctorversuchen ein empfindliches Wasseraufnahmeverhalten sowohl der jungen wie auch der alten Müllverbrennungsschlacke festzustellen. Nach Erreichen des optimalen Wassergehaltes sind nur geringe Steigerungen des Wassergehaltes nötig, um die Grenze zu erreichen, an der nicht mehr das gesamte Wasser in der Probe gebunden wird und während der Verdichtung verstärkt austritt. Für eine Bestimmung der Proctordichte von MV-Schlacke ist somit zu empfehlen, die geforderte Mindestanzahl von fünf zu verdichtenden Einzelproben ([3-6] S. 5) zu erhöhen und entsprechend die Wassergehaltssteigerung in einer kleineren Schrittweise vorzunehmen. Das Potential nicht eindeutiger Ergebnisse durch überhöhte Wasserzugabe kann so reduziert werden. Andere Einflüsse, die bei der Ermittlung von MV-Schlacke-Proctordichten zu beachten sind, betreffen zum einen die Zertrümmerung von Schlackepartikeln und zum anderen die inhomogene stoffliche Zusammensetzungen der Einzelproben. Werden Proben untersucht, die zur Kornzertrümmerung neigen bzw. die durch die Einwirkung der Verdichtungsschläge seitlich ausweichen, so fordert die deutsche Normung, die Proben im Versuch nur einmalig zu verwenden sowie ihre Verdichtung mit aufgelegter kraftverteiler Stahlplatte ([3-6] S. 14). Im Fall der MV-Schlacken ist es jedoch auch unter Einhaltung dieser Forderungen unvermeidlich, dass Kornzertrümmerungen auftreten. Die Körnungslinien und ihre Auswertungen der MV-Schlacke vor und nach dem Proctorversuch in den Abbildungen 4.11-1 und 4.11-2 verdeutlichen die massenanteilige Umverlagerung aus dem Kieskornbereich in den Sandkornbereich aufgrund von Kornzertrümmerungen im Versuch.

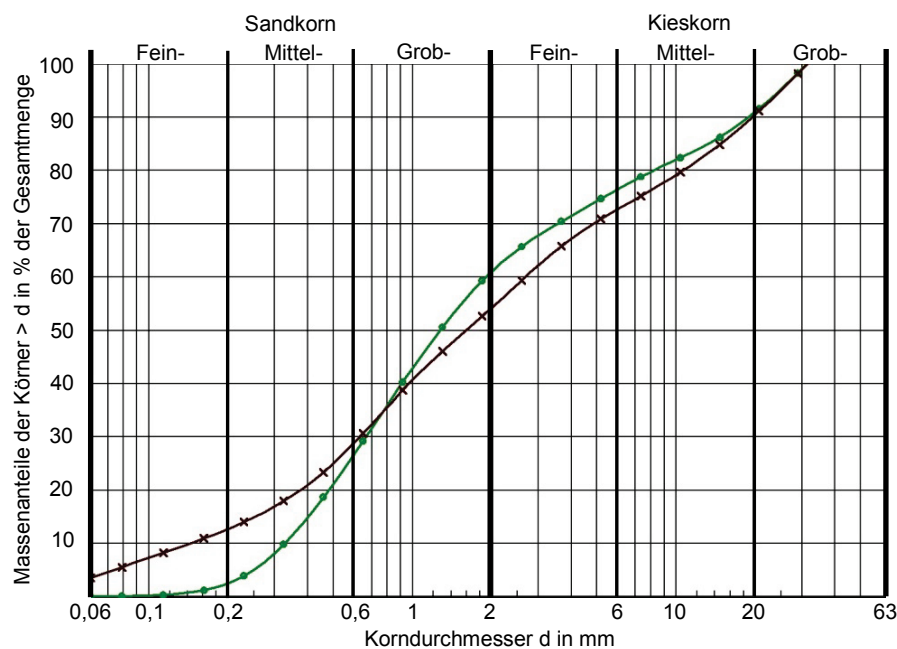


Abb. 4.11-1 Körnungslinien der fünf Wochen alten MV-Schlacke 0/32 mm vor und nach dem Proctorversuch (vgl. Anlage 4.1 - 4.2) ([3-2], [3-11], [3-20])

	Körnungslinie der MV-Schlacke 0/32 mm vor Proctorversuch	Körnungslinie der MV-Schlacke 0/32 mm nach Proctorversuch
Bodenart (DIN 4022 T1)	S, fg, mg', gg'	S, G
Bodengruppe (DIN EN ISO 14688-1)	cgr', mgr', fgr, Sa	Gr, Sa
Bodengruppe (DIN 18196)	SE	GW
T / U / S / G [%]	- / 0,0 / 61,1 / 38,9	- / 3,9 / 50,4 / 45,7
C_u / C_c	5,8 / 0,7	18,8 / 1,0
Kornkennzahl	0064	0055

Abb. 4.11-2 Auswertung der Körnungslinien der fünf Wochen alten MV-Schlacke 0/32 mm vor und nach dem Proctorversuch (vgl. Anlage 4.1 - 4.2) ([3-2], [3-11], [3-20])

Mit der Veränderung der Körnungslinie geht erwartungsgemäß ein verändertes Verdichtungsverhalten einher, sodass die ermittelten Trockendichten nicht mehr repräsentativ für das Ausgangsmaterial sind.

Wird diesem Zertrümmerungseffekt durch die Verwendung neuer Proben je Teilversuch entgegengewirkt, so verstärkt sich der Einfluss der heterogenen Schlackezusammensetzung auf die Dichtermittlung. Aufgrund von Differenzen in den Anteilen verschieden dichter Stoffe in den Einzelproben, verstärken sich so die uneinheitlichen Ausgangsbedingungen vor den Verdichtungen. Durch unterschiedliche empirische Herangehensweisen im Zuge der Proctordichtenermittlung konnte jedoch festgestellt werden, dass die Heterogenität der MV-Schlacke die Versuchsergebnisse in nur sehr geringem Maße beeinflusst.

Auch bei der Analyse der Schlacke-Boden-Gemische konnten Veränderungen der Ergebnisse durch Kornzertrümmerung und Schlackeheterogenität beobachtet werden. Jedoch waren hier die Effekte lange nicht so ausgeprägt wie bei den reinen MV-Schlacken.

Zusammenfassend ist für die Bestimmung der Proctordichte von Proben mit MV-Schlacke-Anteilen eine Versuchsdurchführung mit jeweils neuem Probenmaterial je Einzelversuch und definiert eingestelltem Wassergehalt sowie einer Verdichtung mit aufgelegter Stahlplatte als optimal anzusehen.

4.2.5 Druck-Setzungs-Verhalten

Versuchsbedingungen

Im Kompressionsversuch wurden wie im Proctorversuch Proben der MV-Schlacken, des Kiessandes und der Schlacke-Boden-Gemische mit der definierten Körnungslinie 0-32 mm (siehe Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2) untersucht. Entsprechend der DIN 18135:2011-04 [3-9] sind die Probenmaterialien im Großoedometer mit den Laststufen 50, 100, 200 und 400 kN/m² erst- und zweitbelastet worden. Zwischen den Belastungszyklen wurden die Probekörper in umgekehrter Laststufenreihenfolge bis auf 50 kN/m² entlastet.

Die zu analysierenden Materialien wurden mit einem Probendurchmesser von 500 mm, einer Probenhöhe von $h_0 = 160$ mm und mit ihrer jeweiligen Proctordichte trocken eingebaut.

Für die Berechnung des vom Spannungsintervall j abhängigen Steifemoduls E_{sj} ist die entsprechende Probenhöhe h_{i-1} zu Beginn der jeweiligen Lasterhöhung herangezogen worden, wobei die bezogene Gesamtsetzung (Gesamtstauchung) ε_i einer Laststufe, sowohl in der Druck-Setzungs-Auswertung als auch in der Zeit-Setzungs-Auswertung, auf der Grundlage der Anfangsprobenhöhe h_0 ermittelt worden ist.

$$\text{Gesamtstauchung der } i\text{-ten Laststufe:} \quad \varepsilon_i = \frac{s_i}{h_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\text{Steifemodul der } j\text{-ten Lasterhöhung:} \quad E_{sj} = \frac{\Delta \sigma_j}{\Delta \varepsilon_j} = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{s_i - s_{i-1}} \cdot h_{i-1} \quad [\text{MN/m}^2]$$

(Ermittlung aus der Sekante der Druck-Verformungs-Linie eines Spannungsintervalls)

h_0 → Probenanfangshöhe

i → aktuelle Laststufe

j → Lasterhöhung zwischen Laststufe $i-1$ und Laststufe i

$\Delta \sigma_j$ → Spannungsänderung zwischen Laststufe $i-1$ und Laststufe i

$\Delta \varepsilon_j$ → Stauchungsänderung zwischen Laststufe $i-1$ und Laststufe i

σ_i → Spannung der Laststufe i

σ_{i-1} → Spannung der Laststufe $i-1$

s_i → Setzung der Laststufe i

s_{i-1} → Setzung der Laststufe $i-1$

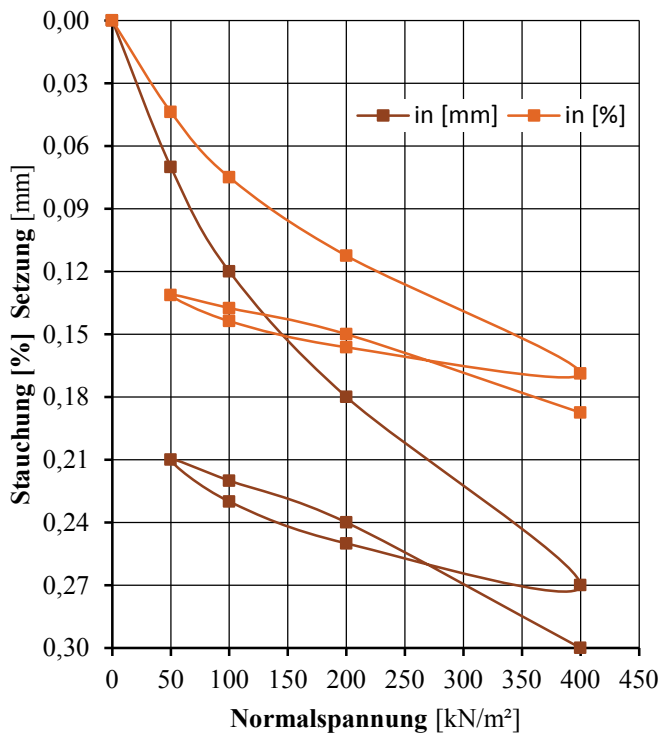
h_{i-1} → Probenhöhe der Laststufe $i-1$

ε_i → Gesamtstauchung der Laststufe i

Versuchsergebnisse

In den Abbildungen 4.12 bis 4.18 werden einerseits die Stauchungen in % und andererseits Setzungen in mm der im Kompressionsversuch untersuchten Stoffgemische grafisch dargestellt. Neben dem Diagramm sind die Wertepaare der jeweiligen Kurven tabellarisch den entsprechenden Belastungs- bzw. Entlastungsstufen zugeordnet. Die aus den Setzungen der untersuchten Stoffe errechneten Setzungsänderungen bei Lasterhöhung bzw. Lastverringern werden zusammen mit den zugehörigen Steifemoduln der Belastungszyklen unterhalb der Grafiken als Zahlenwerte aufgeführt.

Die Abbildungen 4.12 dokumentiert die Kompressionsversuchsergebnisse des reinen Kiessandes mit der definierten Körnungslinie 0-32 mm.

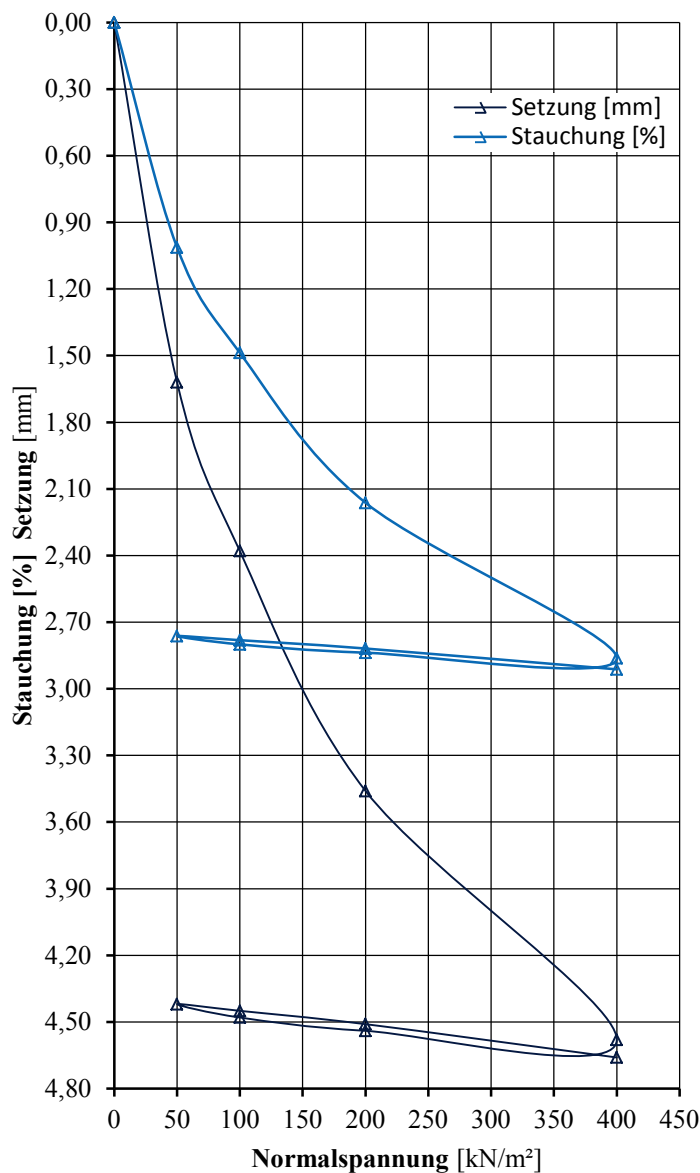


Kiessand		
	Normal- spannung σ_N [kN/m²]	Setzung s [mm]
Erstbel.	50	0,07
	100	0,12
	200	0,18
	400	0,27
Entl.	200	0,156
	100	0,144
	50	0,131
Zweitbel.	100	0,138
	200	0,150
	400	0,188

σ_N [kN/m²]	Erstbelastung					Entlastung			Zweitbelastung		
	0	50	100	200	400	200	100	50	100	200	400
Δs_j [mm]	0,07	0,05	0,06	0,09	-	-0,02	-0,02	-0,02	0,01	0,02	0,06
E_{sj} [MN/m²]	114,3	159,9	266,5	355,2	-	-	-	-	798,9	798,9	532,5

Abb. 4.12 Eindimensionaler Kompressionsversuch des Kiessandes
(vgl. Anlage 14.1 - 14.15)

Für die Setzungen der reinen mehrere Jahre alten MV-Schlacke mit definierter Körnungslinie 0-32 mm wurden im Kompressionsversuch, wie aus Abbildung 4.13 ersichtlich ist, höhere Werte als beim Kiessand ermittelt. Folglich sind die Steifemoduln bei Belastung der Schlacke geringer als die des Bodens. Auch die Hebungen während der Entlastungen fallen größer als beim Kiessand aus.

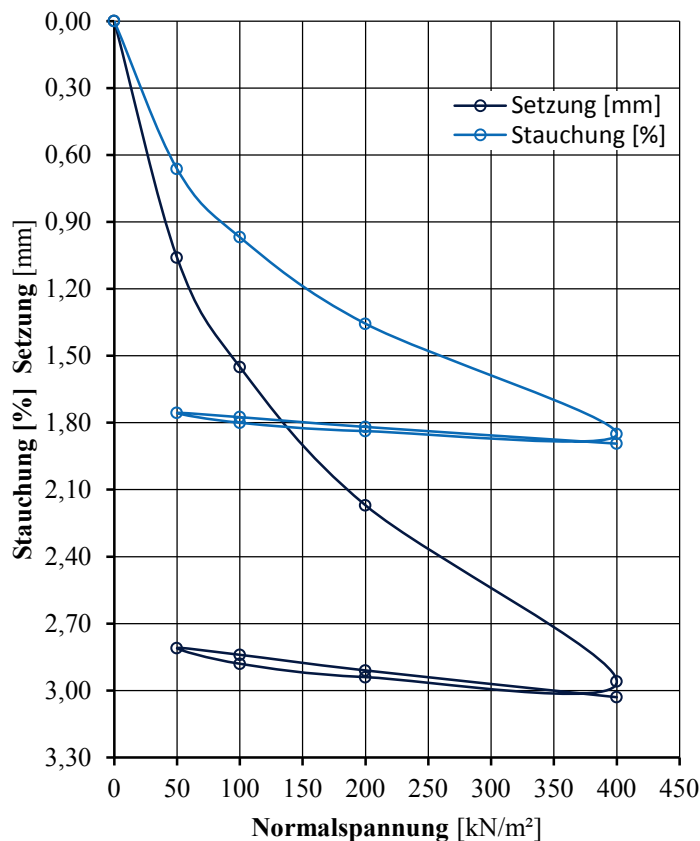


MV-Schlacke Mehrere Jahre alt		
Normal- spannung σ_N [kN/m²]	Stauchung ε [%]	Setzung s [mm]
Erstbel.	50	1,013
	100	1,488
	200	2,163
	400	2,863
Entl.	200	2,834
	100	2,800
	50	2,763
Zweitbel.	100	2,781
	200	2,819
	400	2,913

σ_N [kN/m²]	Erstbelastung					Entlastung			Zweitbelastung		
	0	50	100	200	400	200	100	50	100	200	400
Δs_j [mm]	1,62	0,76	1,08	1,12	-0,04	-0,06	-0,06	-	0,03	0,06	0,15
E_{sj} [MN/m²]	4,9	10,4	14,6	28,0	-	-	-	-	259,3	259,3	207,3

Abb. 4.13 Eindimensionaler Kompressionsversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke (vgl. Anlage 15.1 - 15.15)

Ebenso wie im Proctorversuch können die Versuchswerte denen des Kiessandes angenähert werden, indem mehrere Jahre alte Schlackekörner der Kornfraktionen $> 2-32$ mm durch Bodenpartikel ausgetauscht werden. Die Setzungs- bzw. Stauchungskurve mit den dazugehörigen Werten in Abbildung 4.14 verdeutlicht diese Materialverbesserung.

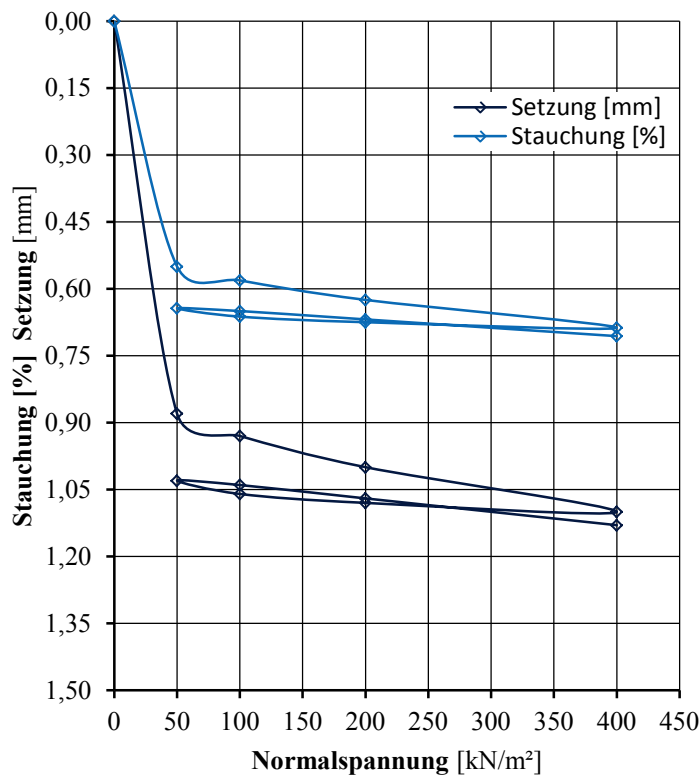


MV-Schlacke-Kies-Gemisch Mehrere Jahre alt		
	Normal- spannung σ_N [kN/m²]	Stauchung ε [%]
Erstbel.	50	0,663
	100	0,969
	200	1,356
	400	1,850
Entl.	200	1,838
	100	1,800
	50	1,756
Zweitbel.	100	1,775
	200	1,819
	400	1,894

σ_N [kN/m²]	Erstbelastung					Entlastung			Zweitbelastung		
	0	50	100	200	400	200	100	50	100	200	400
Δs_j [mm]	1,06	0,49	0,62	0,79	-0,02	-0,06	-0,07	0,03	0,07	0,12	
E_{sj} [MN/m²]	7,5	16,2	25,6	40,0	-	-	-	262,0	224,5	261,8	

Abb. 4.14 Eindimensionaler Kompressionsversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Kies (vgl. Anlage 16.1 - 16.15)

Eine weitere Steigerung der Setzungswerte ist mit dem Austausch der Kornfraktionen 0-4 mm in der mehrere Jahre alten MV-Schlacke zu erreichen. Aus der Abbildungen 4.15 ist ersichtlich, dass mit dem Schlacke-Sand-Gemisch nach der Erstbelastung annähernd Hebungen und Setzungen sowie Steifemoduln wie mit dem Kiessande erreicht werden.

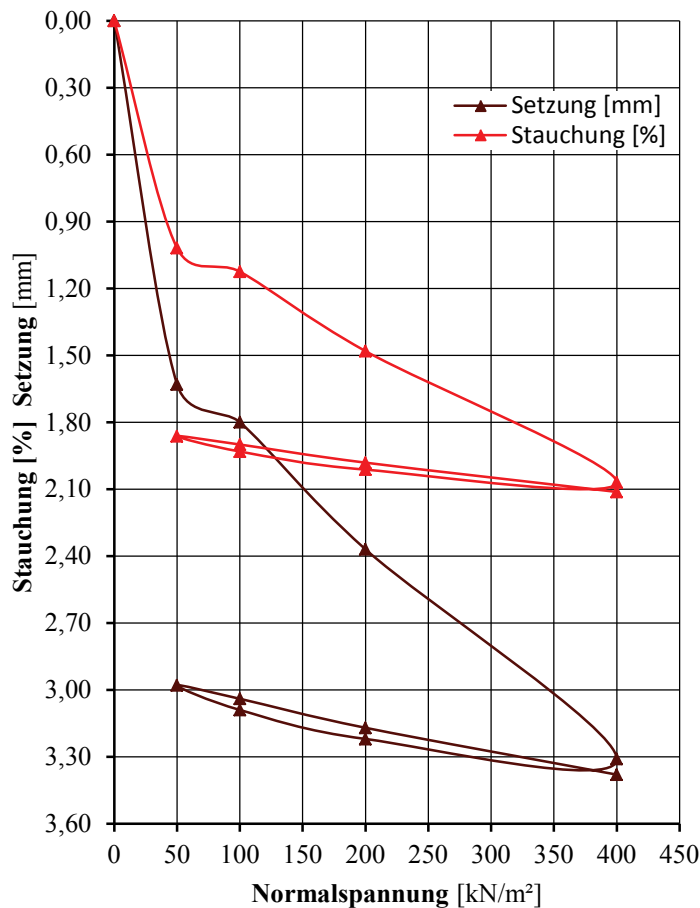


MV-Schlacke-Sand-Gemisch Mehrere Jahre alt		
	Normal- spannung σ_N [kN/m²]	Setzung s [mm]
Erstbel.	50	0,88
	100	0,93
	200	1,00
	400	1,10
Entl.	200	1,08
	100	1,06
	50	1,03
Zweitbel.	100	1,04
	200	1,07
	400	1,13

σ_N [kN/m²]	Erstbelastung					Entlastung			Zweitbelastung		
	0	50	100	200	400	200	100	50	100	200	400
Δs_j [mm]	0,88	0,05	0,07	0,10	-0,02	-0,02	-0,03	0,01	0,03	0,06	
E_{sj} [MN/m²]	9,1	159,1	227,2	318,0	-	-	-	794,8	529,9	529,8	

Abb. 4.15 Eindimensionaler Kompressionsversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Sand (vgl. Anlage 17.1 - 17.15)

Ein ähnliches Setzungsverhalten wie bei der mehrere Jahre alten MV-Schlacke ist auch bei der fünf Wochen alten MV-Schlacke zu beobachten. Die Versuchsergebnisse in Abbildung 4.16 belegen die erheblich größeren Verformungen während der Be- und Entlastungszyklen gegenüber dem Kiessand.

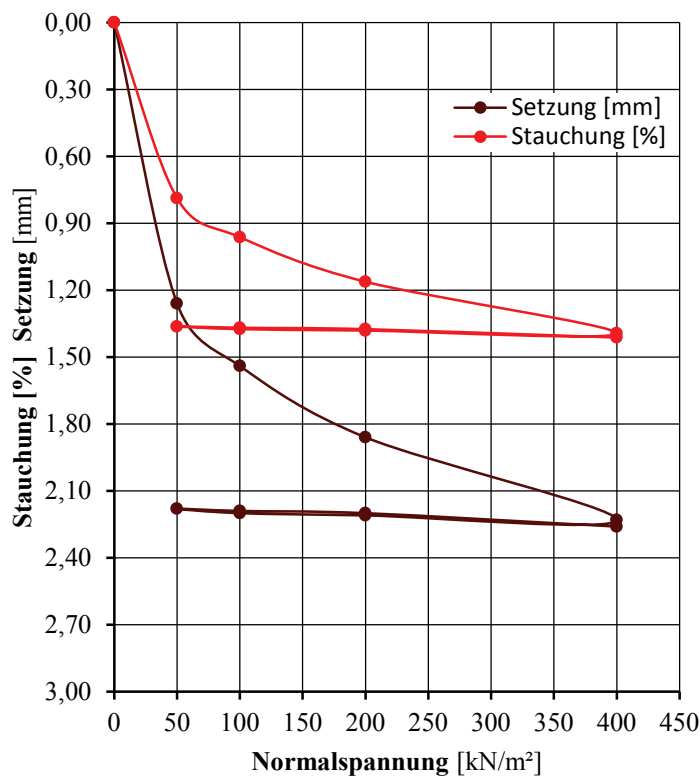


MV-Schlacke Fünf Wochen alt		
	Normal- spannung σ_N [kN/m ²]	Stauchung ε [%]
Erstbel.	50	1,019
	100	1,125
	200	1,481
	400	2,069
Entl.	200	2,013
	100	1,931
	50	1,863
	0	1,800
Zweitbel.	100	1,900
	200	1,981
	400	2,113
	0	1,800

σ_N [kN/m ²]	Erstbelastung					Entlastung			Zweitbelastung		
	0	50	100	200	400	200	100	50	100	200	400
Δs_j [mm]	1,63	0,17	0,57	0,94	-0,09	-0,13	-0,11	0,06	0,13	0,21	
E_{sj} [MN/m ²]	4,9	46,6	27,8	33,5	-	-	-	130,8	120,7	149,4	

Abb. 4.16 Eindimensionaler Kompressionsversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke
(vgl. Anlage 18.1 - 18.15)

Mit dem Austausch von Schlackekornfraktionen durch Boden verbessert sich auch das Setzungsverhalten der fünf Wochen alten Schlacke. Die Steigerungen werden wie bei der alten Schlacke besonders nach der Erstbelastung deutlich. Die in Abbildung 4.17 dokumentierten Werte des Schlacke-Kies-Gemisches der jungen MV-Schlacke lassen auch hier eine starke Annäherung an die Werte des Kiessandes erkennen.

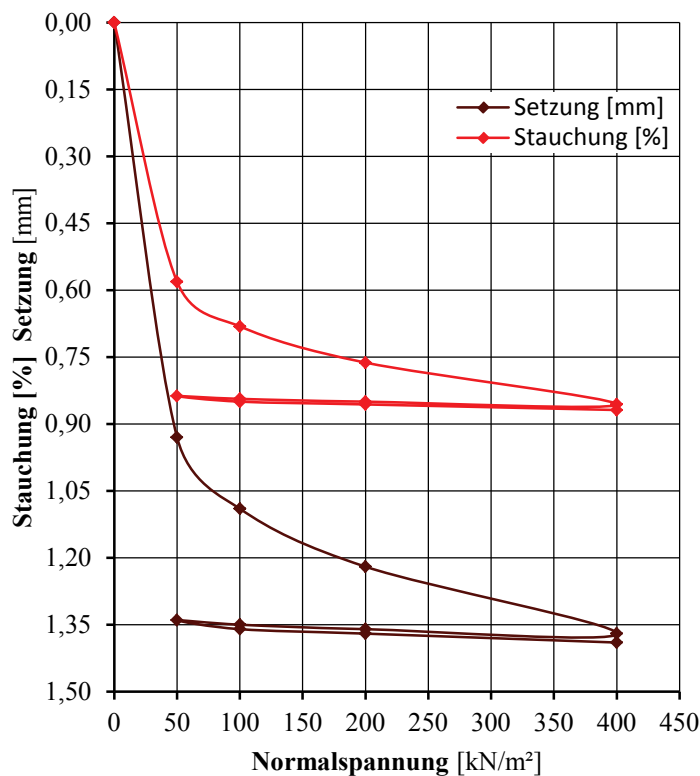


MV-Schlacke-Kies-Gemisch Fünf Wochen alt		
	Normal- spannung σ_N [kN/m ²]	Setzung s [mm]
Erstbel.	50	1,26
	100	1,54
	200	1,86
	400	2,23
Entl.	200	2,21
	100	2,20
	50	2,18
Zweitbel.	100	2,19
	200	2,20
	400	2,26

σ_N [kN/m ²]	Erstbelastung					Entlastung			Zweitbelastung		
	0	50	100	200	400	200	100	50	100	200	400
Δs_j [mm]	1,26	0,28	0,32	0,37	-0,02	-0,01	-0,02	0,01	0,01	0,01	0,06
E_{sj} [MN/m ²]	6,3	28,3	49,5	85,5	-	-	-	789,1	1578,1	1578,1	526,0

Abb. 4.17 Eindimensionaler Kompressionsversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Kies (vgl. Anlage 19.1 - 19.15)

Eine deutliche Steigerung im Setzungsverhalten, gerade nach der Erstbelastung, wie sie beim Schlacke-Sand-Gemisch der alten MV-Schlacke zu erkennen war, ist im Fall der jungen Schlacke nur geringfügig ersichtlich. Die Setzungswerte des Schlacke-Sand-Gemisches in Abbildung 4.18 heben sich hier in kleinerem Maße von denen des Schlacke-Kies-Gemisches aus Abbildung 4.17 ab.

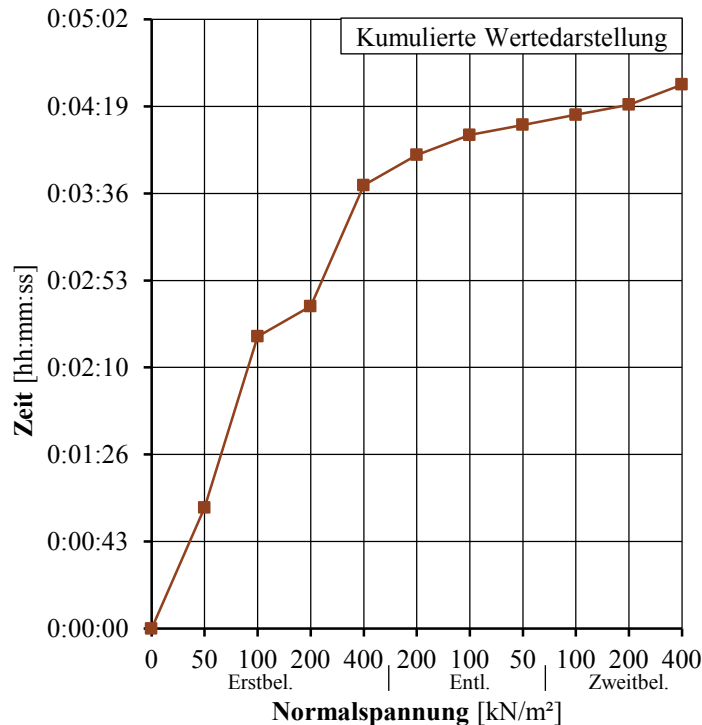


MV-Schlacke-Sand-Gemisch Fünf Wochen alt		
	Normal- spannung σ_N [kN/m ²]	Setzung s [mm]
Erstbel.	50	0,93
	100	1,09
	200	1,22
	400	1,37
Entl.	200	1,36
	100	1,35
	50	1,34
Zweitbel.	100	1,36
	200	1,37
	400	1,39

σ_N [kN/m ²]	Erstbelastung					Entlastung			Zweitbelastung		
	0	50	100	200	400	200	100	50	100	200	400
Δs_j [mm]	0,93	0,16	0,13	0,15	-0,01	-0,01	-0,01		0,02	0,01	0,02
E_{sj} [MN/m ²]	8,6	49,7	122,2	211,7	-	-	-		396,6	1586,4	1586,3

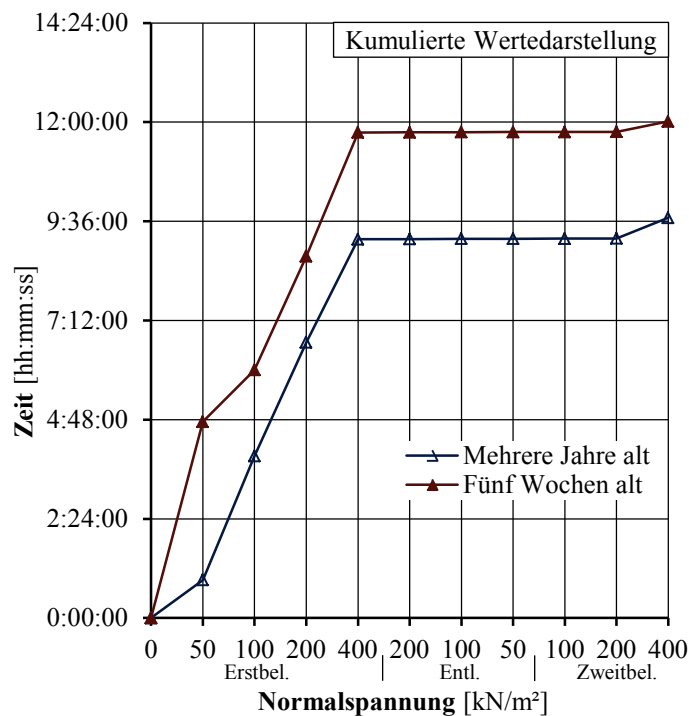
Abb. 4.18 Eindimensionaler Kompressionsversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Sand (vgl. Anlage 20.1 - 20.15)

Die Zeiträume bis zum Abklingen der Setzungen nach einer Laständerung der zuvor beschriebenen Kompressionsversuche sind in den Abbildungen 4.19 bis 4.22 visualisiert. In den Diagrammen werden hierbei die Zeitwerte kumuliert wiedergegeben.



Maximale Konsolidierungszeiten Kiessand		
	Normal- spannung σ_N [kN/m²]	[hh:mm:ss]
Erstbel.	50	0:01:00
	100	0:01:25
	200	0:00:15
	400	0:01:00
Entl.	200	0:00:15
	100	0:00:10
	50	0:00:05
Zweitbel.	100	0:00:05
	200	0:00:05
	400	0:00:10

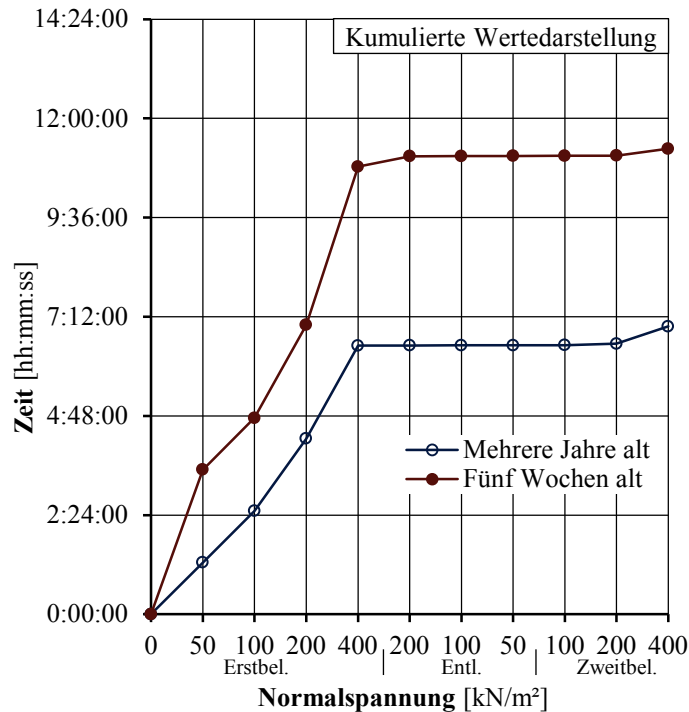
Abb. 4.19 Maximale Konsolidierungszeit je Laststufe des Kiessandes (vgl. Anlage 14.1 - 14.15)



Maximale Konsolidierungszeiten MV-Schlacken			
	Normal- spannung σ_N [kN/m ²]	Mehrere Jahre alt [hh:mm:ss]	Fünf Wochen alt [hh:mm:ss]
Erstbel.	50	0:55:00	4:45:00
	100	3:00:00	1:15:00
	200	2:45:00	2:45:00
	400	2:30:00	3:00:00
Entl.	200	0:00:15	0:00:15
	100	0:00:20	0:00:10
	50	0:00:10	0:00:10
Zweitbel.	100	0:00:10	0:00:10
	200	0:00:10	0:00:10
	400	0:30:00	0:15:00

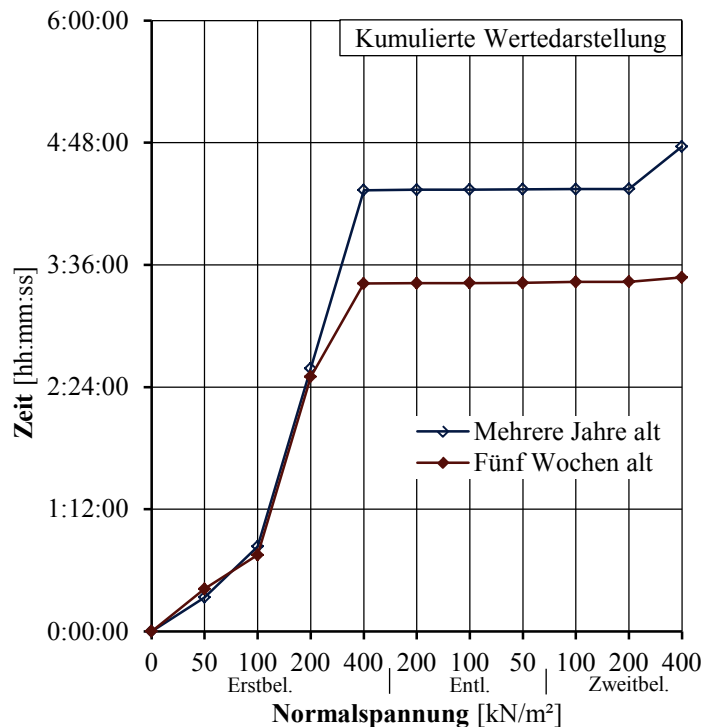
Abb. 4.20 Maximale Konsolidierungszeit je Laststufe der MV-Schlacken (vgl. Anlage 15.1 - 15.15 und Anlage 18.1 - 18.15)

Ähnlich wie bei den Setzungen nähern sich auch die Setzungszeiträume der MV-Schlacken an die des Kiessandes an, wenn Schlackepartikel durch Boden ersetzt werden. Hier sind die Angleichungen an den Boden speziell bei den Zeiträumen der Zweitbelastung zu beobachten.



Maximale Konsolidierungszeiten MV-Schlacke-Kies-Gemische		
Normal- spannung σ_N [kN/m²]	Mehrere Jahre alt [hh:mm:ss]	Fünf Wochen alt [hh:mm:ss]
Erstbel.	50	1:15:00
	100	1:15:00
	200	1:45:00
	400	2:15:00
Entl.	200	0:00:15
	100	0:00:10
	50	0:00:10
Zweitbel.	100	0:00:05
	200	0:02:15
	400	0:25:00
		0:10:00

Abb. 4.21 Maximale Konsolidierungszeit je Laststufe der Schlacke-Kies-Gemische (vgl. Anlage 16.1 - 16.15 und Anlage 19.1 - 19.15)



Maximale Konsolidierungszeiten MV-Schlacke-Sand-Gemische		
Normal- spannung σ_N [kN/m²]	Mehrere Jahre alt [hh:mm:ss]	Fünf Wochen alt [hh:mm:ss]
Erstbel.	50	0:20:00
	100	0:30:00
	200	1:45:00
	400	1:45:00
Entl.	200	0:00:15
	100	0:00:10
	50	0:00:10
Zweitbel.	100	0:00:05
	200	0:00:05
	400	0:25:00
		0:02:35

Abb. 4.22 Maximale Konsolidierungszeit je Laststufe der Schlacke-Sand-Gemische (vgl. Anlage 17.1 - 17.15 und Anlage 20.1 - 20.15)

Versuchsauswertung

Werden Böden und bodenähnliche Konglomerate im Oedometer einachsig belastet, entstehen spannungsabhängig Verformungen der festen Kornbestandteile und Volumenänderungen im offenen Porenraum des Gefüges. Die im Versuch zu untersuchenden Spannungsbereiche richten sich dabei nach den in der Geotechnik anzutreffenden Belastungsgrößen und liegen überwiegend weit unterhalb der Bruchlasten von Bodenpartikeln, sodass diese sich weitestgehend elastisch verhalten. Im Hinblick auf Müllverbrennungsschlacke ist das Verhalten der festen Partikel diffiziler einzustufen. Neben elastischen Verformungen erfahren Schlackepartikel im relevanten Belastungsspektrum auch plastische Formänderungen und sogar Beanspruchungen über ihre Bruchgrenzen hinaus. Letzteres tritt hauptsächlich in Form von Abplatzungen aufgrund punktuellen Verhakens zwischen Schlackepartikeln der Sand- und Kies Kornfraktionen auf.

Eine plastische Verformung des Korngerüsts, die bei Böden maßgeblich aus der lastabhängigen Kornumlagerung mit Reduzierung der Porenräume herrührt, wird somit bei den MV-Schlacken durch plastische Partikelverformungen und Kornzertrümmerungen verstärkt. Die Setzungsänderungen der Erstbelastungen abzüglich der jeweiligen Rückverformungen während der Entlastungen fallen gegenüber denen des Kiessandes erheblich höher aus und verdeutlichen diese Schlackeeigenschaften.

Auch die elastischen Stauchungen fester Schlackepartikel übersteigen die der Kiessandkörner, was anhand größerer Schwellwerte der reinen MV-Schlacken in den Entlastungsstufen erkennbar ist. Die Dilatation¹ von MV-Schlacken lässt sich somit näherungsweise durch folgende Gleichung beschreiben:

$$\varepsilon_{MV-Schlacke} = \varepsilon_{pl P} + \varepsilon_{pl K} + \varepsilon_{el K}$$

Dabei bezeichnet $\varepsilon_{pl P}$ die plastische Stauchung aufgrund der Reduzierung des Porenraumes, $\varepsilon_{pl K}$ die plastische Stauchung der festen Körner und $\varepsilon_{el K}$ die elastische Stauchung der festen Körner. Im Gegensatz dazu sind bei Böden die plastischen Verformungen der festen Bestandteile in der Regel vernachlässigbar klein, sodass hier gilt:

$$\varepsilon_{Boden} = \varepsilon_{pl P} + \varepsilon_{el K}$$

¹ Dilatation ist die Summe aus plastischer und elastischer Volumenänderungen im Korngefüge.

Werden weiter auch die sehr geringen elastischen Verformungen der festen Bodenbestandteile vernachlässigt, lässt sich im Oedometerversuch für Böden folgender direkter Zusammenhang zwischen Stauchung und Porenanteil definieren:

$$\varepsilon_{1\text{Boden}} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\Delta V_P}{V_0} = \Delta n \quad \text{mit} \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$$

Bei MV-Schlacken sind die Verformungen fester Bestandteile im Oedometerversuch nicht grundsätzlich vernachlässigbar, sodass sie die Stauchungen mit beeinflussen und diese nicht mehr direkt proportional zu den Änderungen der Porenanteile sind:

$$\varepsilon_{1\text{MV-Schlacke}} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\Delta V_P + \Delta V_K}{V_0} \neq \Delta n \quad \text{mit} \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$$

Zusätzlich ändert sich mit der Belastung nicht nur der zu Beginn vorhandene offene Porenanteil, sondern es entstehen neue offenporige Anteile aus anfangs geschlossenen Poren durch die Kornzertrümmerungen. Die Bestimmung der Zertrümmerungsanteile bzw. die damit einhergehende Beeinflussung des Porenvolumens ist für eine Entwicklung genauerer Rechenmodelle zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen Stauchung und Porenanteil notwendig, jedoch in der Praxis kaum zu realisieren.

Für die Berechnung von Setzungen infolge von Spannungsänderungen hat es sich für Böden als zweckmäßig erwiesen, den Steifemodul als Basisgröße heranzuziehen.

Unter der zulässigen Annahme, dass zur Beschreibung von Vorformungen eines Bodens das Hookesche Gesetz herangezogen werden kann, entsteht die Möglichkeit, Vergleiche zwischen Steife- und Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Querkontraktionszahl² ν (Poissonzahl) zu ziehen. Im Oedometerversuch ergibt sich so für $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ und $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 \cdot \nu / (1 - \nu)$ ein Zusammenhang zwischen den Moduln nach der Gleichung:

$$E = \left(1 - \frac{2 \cdot \nu^2}{1 - \nu} \right) \cdot E_s$$

Diskrepanz steht diesem Vergleich jedoch gegenüber, dass Boden sich nicht einmal annähernd entsprechend den Gesetzen der Elastizitätstheorie verhält und eine reversible Energiespeicherung in Form von elastischen Bodendehnungen nur in geringem Maße möglich ist.

² Querkontraktionszahl definiert das Verhältnis aus der relativen Änderung der Probenhöhe und der relativen Änderung der Probenbreite bzw. des Probendurchmessers bei äußerer Kraft- oder Spannungseinwirkung.

Selbst wenn die Versuchsergebnisse der MV-Schlacken und deren Bodengemische einen größeren elastischen Verformungsanteil vermuten lassen, sind auch bei ihnen die Beziehungen zwischen aufgebrachten Spannungsänderungen und zugehörigen resultierenden vertikalen Stauchungen weit von einer spannungsunabhängigen Linearität entfernt.

Aus diesem Grund wird auf eine Verformungsanalyse aus Sicht der Elastizitätstheorie nicht weiter eingegangen. Auch die Querkontraktionszahl ν wird demzufolge für die Schlacke nicht versuchstechnisch ermittelt.

Beim Vergleich des Spannungs-Verformungs-Verhaltenes der untersuchten Stoffe zeigt sich, dass reine MV-Schlacke die größten Verformungen aufweist. Anhand der in Tabelle 4.5 dargestellten Setzungsänderungen wird ersichtlich, dass die Gesamtsetzungen der Schlacken während Erstbelastung annähernd das 12 bis 17-fache des Kiessandwertes erreichen.

	Setzungsänderungen Δs in mm während der		
	Erstbelastung	Entlastung	Zweitbelastung
Kiessand	0,27	-0,06	0,09
MV-Schlacke Mehrere Jahre alt	4,58	-0,16	0,24
MV-Schlacke-Kies-Gemisch Mehrere Jahre alt	2,96	-0,15	0,22
MV-Schlacke-Sand-Gemisch Mehrere Jahre alt	1,10	-0,07	0,10
MV-Schlacke Fünf Wochen alt	3,31	-0,33	0,40
MV-Schlacke-Kies-Gemisch Fünf Wochen alt	2,23	-0,05	0,08
MV-Schlacke-Sand-Gemisch Fünf Wochen alt	1,37	-0,03	0,05

Tab. 4.5 Maximale Verformungen der untersuchten Materialien im Kompressionsversuch (eigene Tabelle)

Die größeren Schlackesetzungen sind in erster Linie auf eine größere Oberflächenrauigkeit der Körner zurückzuführen und im Weiteren die Folge von Kornzertrümmerungen und -abplatzungen. Bestätigt wird diese These durch die Verringerung der Gesamtsetzungen der Schlacke-Kies-Gemische, in denen das Schlackekornband mit dem höheren Zertrümmerungs- und Abplatzungspotenzial substituiert worden ist, und einer weiteren Gesamtsetzungsreduzierung der Schlacke-Sand-Gemische, bei denen kleinere Korngrößen mit größerer Gesamtoberfläche und einer höheren Anzahl von Kontaktpunkten ausgetauscht worden sind.

In der Zweitbelastung nähern sich die Werte der Gesamtsetzung zwischen Kiessand und Schlacke an. Auch ist eine Abnahme der Setzungen in den Schlackegemischen mit Kies und eine weitere Abnahme in den Gemischen mit Sand erkennbar. Die Schlacke-Boden-Gemische, vorrangig diejenigen mit Sand, erreichen bzw. unterschreiten sogar die Gesamtsetzungswerte des Kiessandes.

Werden die Hebungen der Entlastungsphase in die Auswertung der Zweitbelastungssetzungen einbezogen, so wird deutlich, dass die Zweitbelastungssetzungen zu einem Großteil aus den elastischen Rückverformungen der Entlastungsphase bestehen. Neue Setzungen im Schlackekorngerüst sind genauso wie beim Kiessand kaum noch zu verzeichnen.

Quantitativ ähnliche Resultate im Vergleich zwischen Schlacke-Boden-Gemischen, Kiessand und Schlacke liefern die Untersuchungen der Konsolidation in Abhängigkeit von der Zeit. Im Zusammenspiel mit den größten Setzungen während der Erstbelastung, werden in dieser Belastungsphase für alle beprobten Stoffe die längsten Konsolidationszeiten offenkundig. In den darauffolgenden Entlastungs- und Wiederbelastungsstufen stellt sich mit der Abnahme der Verformungen und einhergehenden Reduzierungen von Umlagerungsprozessen eine deutliche Verkürzung der Konsolidationszeiten ein.

Ausgehend vom größeren mechanischen Verbund zwischen den rauen kantigen Schlackekörnern im Gegensatz zu abgerundeten glatten Kies- und Sandkörnern steigt die Kornumlagerungszeit mit Zunahme der spezifischen Schlackekornoberfläche. Daraus erklärt sich, dass in den Erstbelastungsstufen für die MV-Schlacken die längsten und für den Kiessand die geringsten Konsolidierungszeiten gemessen worden sind. Die Verringerung dieser Zeiten zwischen Schlacke-Kies-Gemischen und Schlacke-Sand-Gemischen lässt sich ebenso auf die Einflüsse der spezifischen Schlackekornoberflächen zurückführen.

In den Entlastungs- und Wiederbelastungsstufen nähern sich die Zeiten bis zum Abklingen der Setzungen bzw. der Hebungen zwischen Kiessand, Schlacken und Schlacke-Boden-Gemischen an, da in diesen Versuchsphasen Verformungen maßgeblich aus der Deformation der Körner selbst und somit unabhängig von den Kornoberflächen entstehen. Lediglich in der letzten Wiederbelastungsstufe steigt die Konsolidierungsdauer der Materialien mit Schlackeinhalt wieder an, was auf Restumlagerungen zurückzuführen ist. Derartige Setzungserscheinungen können aus sich lösenden Kornverspannungen in der Entlastungsphase und damit verbundenen Kornabplatzungen hervorgehen.

4.2.6 Scherfestigkeit

Versuchsbedingungen

Die Scherfestigkeiten der MV-Schlacken, des Kiessandes und der Schlacke-Boden-Gemische wurden entsprechend der DIN 18137-3:2002-09 [3-10] ermittelt. Sie wurden mit der definierten Kornverteilung 0-32 mm (siehe Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2) im Großrahmenschergerät untersucht. Alle Proben sind mit ihrer jeweiligen Proctordichte in den Scherrahmen ($L \times B = 500 \times 500 \text{ mm}$) mit einer Höhe H von 160 mm eingebaut worden.

Grenzen der Probenhöhen ([3-10] S. 9):

Minimale Probenhöhe für ein Größtkorn von 32 mm:

$$H_{\min} = 5 \cdot 32 \text{ mm} = 160 \text{ mm}$$

Maximale Probenhöhe bei einer Probenlänge von 500 mm:

$$H_{\max} / a = 1/3$$

$$H_{\max} = 1/3 \cdot a = 1/3 \cdot 500 \text{ mm} = 166.67 \text{ mm}$$

Unter der Annahme, dass sich auch die MV-Schlacken im direkten Scherversuch wie nichtbindige Böden verhalten, wurden alle Untersuchungen an trockenen Proben durchgeführt und die Schergeschwindigkeit bzw. die Konsolidationszeit entsprechend den Randbedingungen der DIN gewählt:

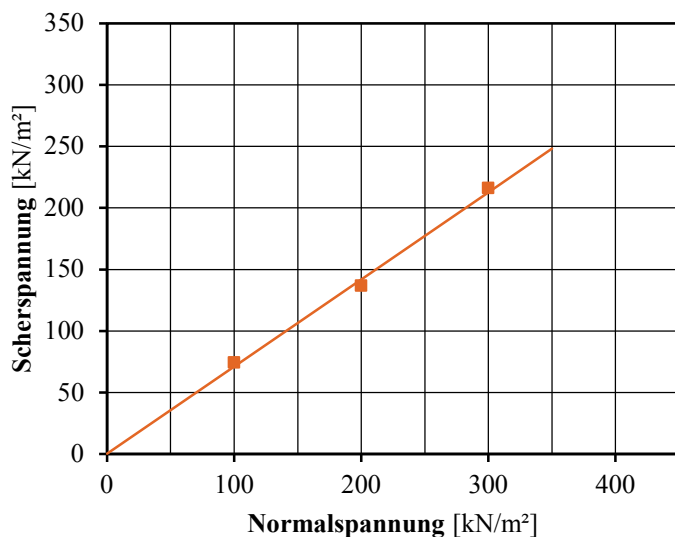
- Maximale Schergeschwindigkeit = 0,5 mm/min ([3-10] S. 15)
- Mindestkonsolidationszeit für nichtbindige Böden = 30 min ([3-10] S. 13)

Die Scherspannungsverläufe der MV-Schlacken, des Kiessandes und der Schlacke-Boden-Gemische wurden nach einer einstündigen Konsolidation jeweils für die Normalspannungsstufen 100, 200 und 300 kN/m² bei einer Schergeschwindigkeit von 0,3 mm/min ermittelt. Die Konsolidationsspannungen und die Normalspannungen des zugehörigen Schervorganges wurden dabei mit gleicher Größe gewählt. Alle Scherspannungen wurden abweichend von der DIN mit der sich in Abhängigkeit vom zurückgelegten Scherweg verringernden Scherfläche ermittelt, was sich darin begründet, dass im Großrahmenschergerät die Änderungen der Scherfläche erheblich sein können.

Versuchsergebnisse

Die Abbildungen 4.23 bis 4.28 zeigen die Schergeraden des Kiessandes, der alten und jungen MV-Schlacke sowie die der Schlacke-Boden-Gemische, deren Steigung dem inneren Reibungswinkel des jeweiligen Materials entspricht. Neben den Diagrammen sind die auflastabhängigen maximalen Scherspannungen tabellarisch zusammengefasst, auf deren Grundlage die Schergerade gebildet wird.

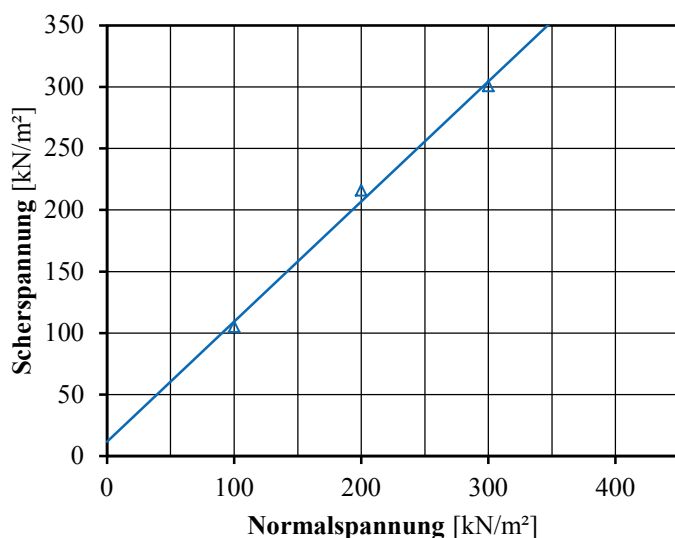
In Abbildungen 4.23 wird der Scherversuch des reinen Kiessandes dokumentiert. Im Vergleich zur mehrere Jahre alten MV-Schlacke, deren Versuchsergebnisse in Abbildung 4.24 dargestellt sind, besitzt der Kiessand einen geringeren Reibungswiderstand.



Kiessand		
Teilversuch	Normalspannung σ' [kN/m²]	Scherfestigkeit τ_f [kN/m²]
1	100	74,0
2	200	136,6
3	300	215,8

Innerer Reibungswinkel $\varphi' = 35,3^\circ$	
Kohäsion c'	= 0,3 kN/m²
Korrelation	= 0,998

Abb. 4.23 Scherversuch des Kiessandes (vgl. Anlage 21)



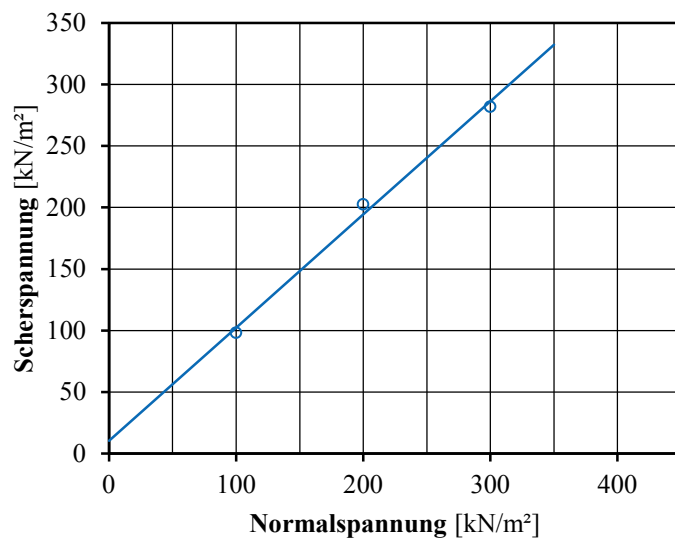
MV-Schlacke Mehrere Jahre alt		
Teilversuch	Normalspannung σ' [kN/m²]	Scherfestigkeit τ_f [kN/m²]
1	100	105,1
2	200	215,8
3	300	300,6

Innerer Reibungswinkel $\varphi' = 44,3^\circ$	
Kohäsion c'	= 11,7 kN/m²
Korrelation	= 0,997

Abb. 4.24 Scherversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke (vgl. Anlage 22)

Mit dem Austausch von Schlackekornfraktionen durch Bodenkörner verringern sich die Scherparameter und nähern sich den Eigenschaften des Kiessandes an.

Die entsprechenden Scherspannungen, inneren Reibungswinkel und Kohäsionen der Gemische aus mehrerer Jahre alter MV-Schlacke und Boden sind in den Abbildungen 4.25 und 4.26 ersichtlich.



MV-Schlacke-Kies-Gemisch Mehrere Jahre alt

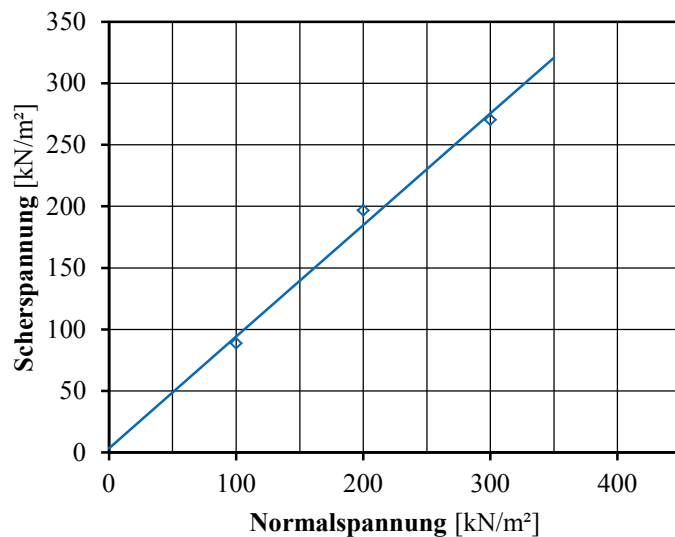
Teil- versuch	Normal- spannung σ' [kN/m²]	Scher- festigkeit τ_f [kN/m²]
1	100	98,1
2	200	202,2
3	300	281,7

Innerer Reibungswinkel $\varphi' = 42,6^\circ$

Kohäsion $c' = 10,4 \text{ kN/m}^2$

Korrelation = 0,997

Abb. 4.25 Scherversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Kies (vgl. Anlage 23)



MV-Schlacke-Sand-Gemisch Mehrere Jahre alt

Teil- versuch	Normal- spannung σ' [kN/m²]	Scher- festigkeit τ_f [kN/m²]
1	100	88,6
2	200	196,5
3	300	270,3

Innerer Reibungswinkel $\varphi' = 42,2^\circ$

Kohäsion $c' = 3,5 \text{ kN/m}^2$

Korrelation = 0,994

Abb. 4.26 Scherversuch der mehrere Jahre alten MV-Schlacke gemischt mit Sand (vgl. Anlage 24)

Die fünf Wochen alte MV-Schlacke besitzt genau wie die mehrere Jahre alte MV-Schlacke größere Scherparameter als der Kiessand. Die Auswertung ihres Scherversuches wird in Abbildung 4.27 dargestellt.

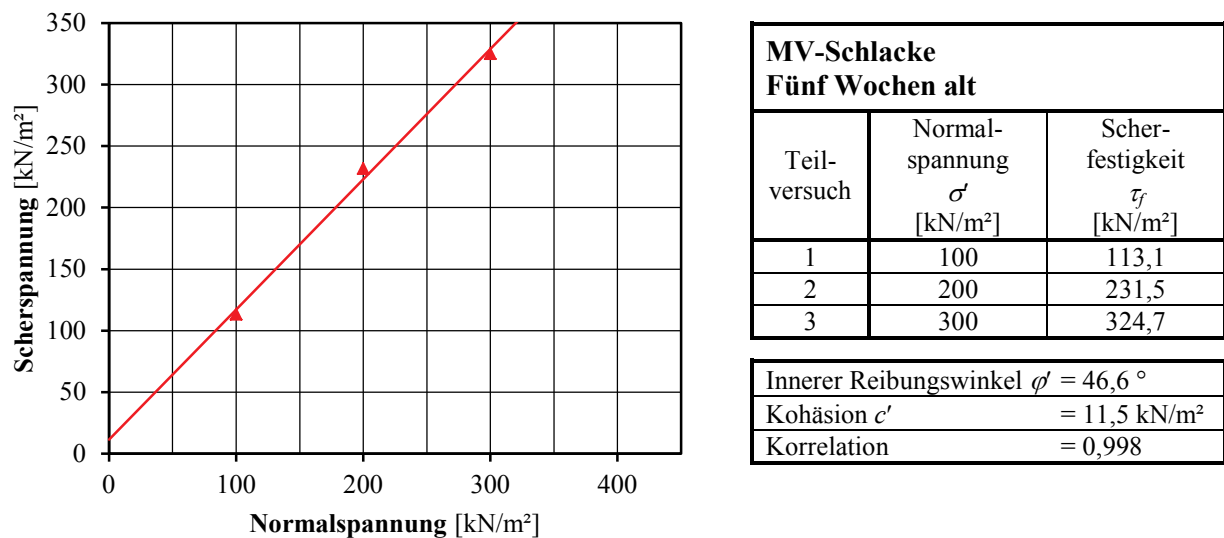


Abb. 4.27 Scherversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke (vgl. Anlage 25)

Das Schlacke-Kies-Gemisch der fünf Wochen alten MV-Schlacke, deren Scherparameter der Abbildung 4.28 zu entnehmen sind, nähert sich wie bereits das äquivalente Gemisch aus alter MV-Schlacke und Boden in seinen Schereigenschaften an die des Kiessandes an.

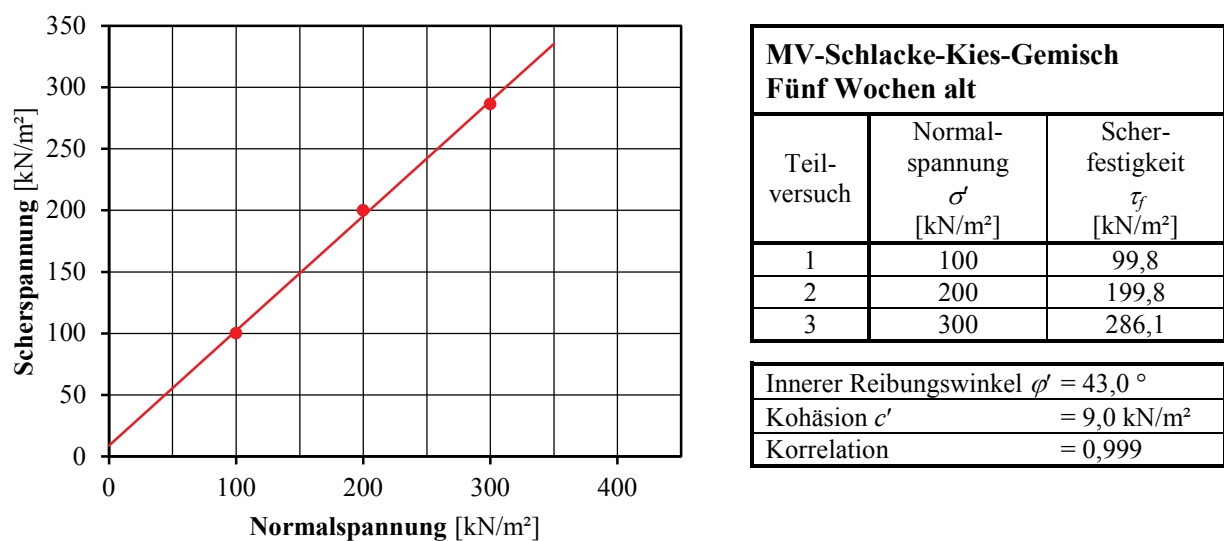


Abb. 4.28 Scherversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Kies (vgl. Anlage 26)

Im Gemisch aus fünf Wochen alter MV-Schlacke und Sand wird, wie aus Abbildung 4.29 ersichtlich ist, die Annäherung der Scherparameter an die des Kiessandes noch deutlicher.

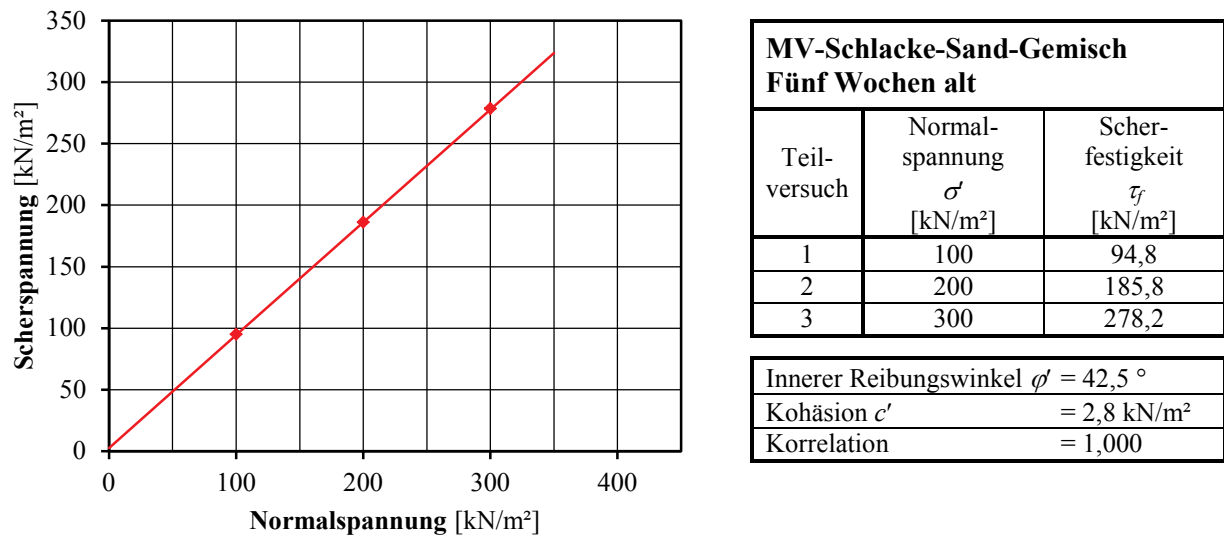


Abb. 4.29 Scherversuch der fünf Wochen alten MV-Schlacke gemischt mit Sand (vgl. Anlage 27)

In Abbildung 4.30 sind die Scherspannungsverläufe der Scherversuche zusammengefasst.

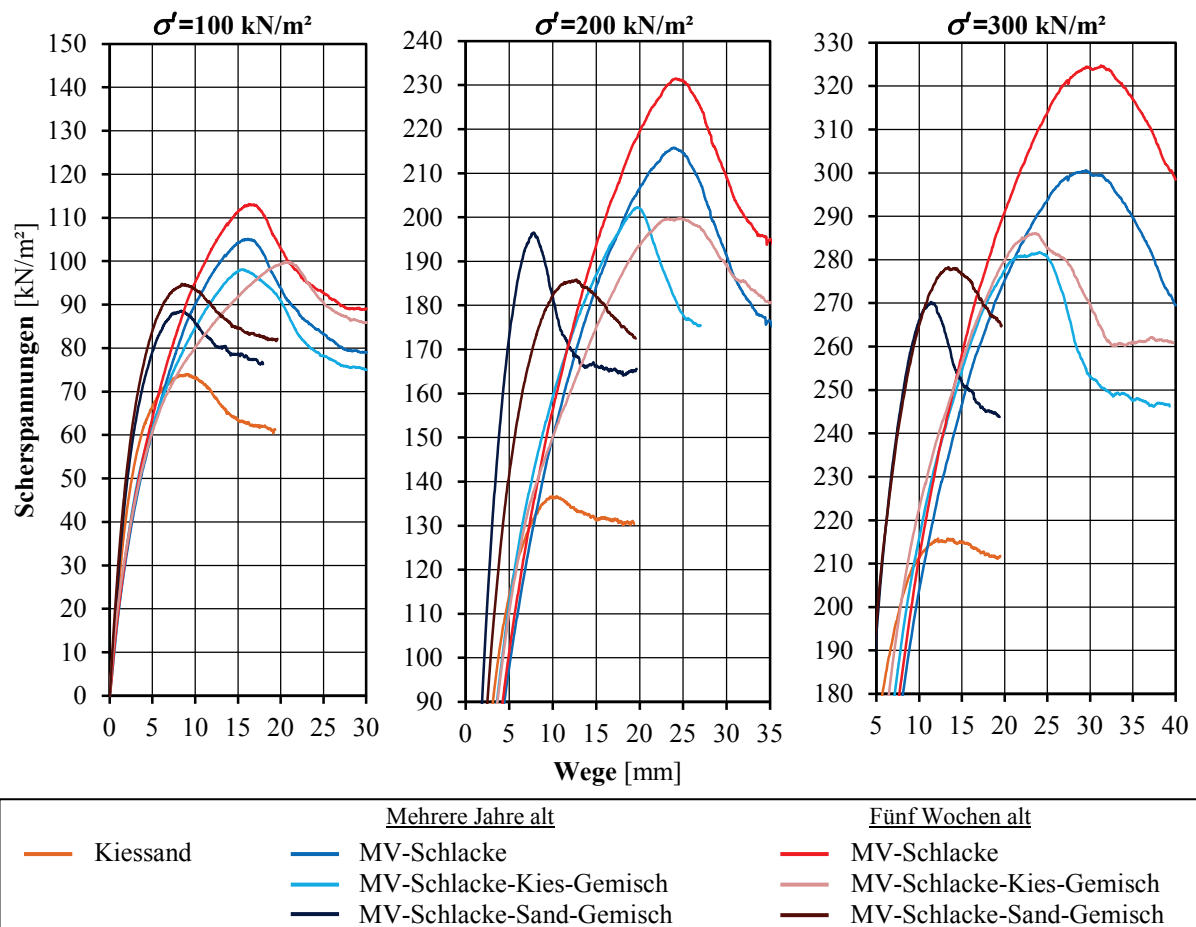


Abb. 4.30 Scherspannungsverläufe des Kiessandes, der MV-Schlacken und MV-Schlacke-Boden-Gemische (vgl. Anlage 21 - 27)

Versuchsauswertung

Scherbeanspruchungen in Korngefügen führen zu Teilchenumlagerungen, bei denen die Feststoffteilchen Rotations- und Gleitbewegungen gegeneinander ausführen. Erreichen die im Gefüge hervorgerufenen Spannungen den maximal aufnehmbaren Wert, kommt es zum Versagen und die Scherfestigkeit des Materials ist erreicht.

Die Verläufe der Scherspannungsanstiege in Abbildung 4.30 weisen für alle untersuchten Proben die Charakteristik eines überkonsolidierten Bodens auf, die durch den Anstieg der Schubspannung bis zu einem Peak mit darauffolgendem Spannungsverlust gekennzeichnet ist. Der erreichte Schubspannungspeak bezeichnet dabei die Scherfestigkeit τ_f des jeweiligen Korngefüges. Als Ursache für eine derartige Schercharakteristik ist unter anderem die Untersuchung an mit Proctordichte eingebauten Probekörpern zu nennen, die zufällig mit höheren Normalspannungen während der Einbauverdichtung beaufschlagt worden sind, als es im anschließenden Scherprozess der Fall war.

Ähnlich wie zuvor in der Auswertung der Kompressionsversuche zeigt sich eine stärkere Angleichung der Materialcharakteristik von MV-Schlacke an diejenige des Kiessandes durch den Austausch kleinerer Korngrößen wie Sand als es bei den Schlacke-Kies-Gemischen der Fall ist. Speziell spiegelt sich die Annäherung in den Scherspannungsverläufen und auch in den Scherparametern ϕ' und c' an sich wider, wobei hier grundsätzlich für die Proben mit Schlackekornanteilen höhere Werte als für den reinen Kiessand ermittelt worden sind. Eine Ursache für den Zuwachs der Scherwiderstände ist in diesem Zusammenhang in der für Schlackekörner typischen, klüftig rauen Oberfläche und einer zum Teil plattigen bzw. kantigen Kornform zu finden, die verstärkt Rotations- und Gleitbewegungen der Körner behindert. Hinzu kommen durch die genannten Korneigenschaften vermehrt auftretende Verspannungen im Korngerüst, die bereits während der Verdichtung entstehen und eine potentielle Ursache für die sich ergebenden scheinbaren Kohäsionswerte bilden.

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass bereits geringfügige Kornumlagerungen zur Eliminierung der Verspannungen führen, wodurch die Schubspannung, die auch ohne äußere Einwirkung einer Normalspannung vom Korngerüst aufgenommen wird, verloren geht. Eine dauerhaft statisch ansetzbare Kohäsion, die aufgrund elektromagnetischer Anziehungskräfte zwischen den feinen Partikeln untereinander und zum umgebenden Porenwasser entsteht, kann nicht plausibel angesetzt werden, da alle Scherversuche mit getrocknetem Material durchgeführt worden sind und der verhältnismäßig kleine Massenanteil feiner Partikel nur untergeordnet Kohäsionskräfte im Gesamtgefüge hervorruft.

Kornzertrümmerungen treten in den durchgeführten Scherversuchen aufgrund der verwendeten Normalspannungsbereiche nur an Schlackepartikeln auf. Sind Partikel in der Scherfuge davon betroffen, beeinflusst auch hier die Kornverteilungsänderung die Versuchsergebnisse. Durch plötzliches Wegbrechen von Kraftübertragungsflächen sowie damit einhergehenden Auflockerungen können sich die aufnehmbaren Scherspannungen reduzieren. Im Gegensatz dazu erhöht ein Zuwachs an feinen Schlackepartikeln angesichts der daraus resultierenden Vergrößerung effektiver Kontaktflächen zwischen den Partikeln den Scherwiderstand. Eine Bewertung, welcher der beiden Einflüsse überwiegt und inwieweit dadurch die Versuchsergebnisse maßgeblich positiv oder negativ verändert werden, ist an dieser Stelle, auch unter dem Gesichtspunkt, dass sich ihre Präsenz der entsprechend stofflicher Schlackezusammensetzungen ändert, nicht möglich. Für eine dahingehende tiefgreifende Analyse sind die Scherparameter weiterer unterschiedlicher Körnungslinien zu untersuchen, um feststellen zu können, welche Wirkung die verschiedenen Korngrößen auf die Scherparameter von MV-Schlacken ausüben. Ergänzend ist gesondert festzustellen, inwieweit sich die Anteile von Kornfraktionen im Schlackegefüge durch den Schervorgang verändern und von welchen Randbedingungen die Kornzertrümmerungen abhängig sind.

4.2.7 Wasserdurchlässigkeit

Versuchsbedingungen

In der Geotechnik wird die Wasserdurchlässigkeit von Böden und anderen Korngemischen durch den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k definiert, der nach DIN 18130-1:1998-05 [3-8] durch zwei grundsätzliche Verfahrensvarianten bestimmt werden kann. Für schwach bis sehr schwach durchlässige Kornzusammensetzungen eignet sich vorrangig das Verfahren mit konstantem hydraulischen Gefälle. Das zweite Prüfverfahren mit veränderlichem hydraulischen Gefälle ist primär für durchlässige bis stark durchlässige Materialien zu verwenden.

Unter der Annahme, dass der Kiessand in zuletzt genannte Durchlässigkeitsbereiche einzugruppieren ist und eine Verfahrensgleichheit für alle Untersuchungen vorhanden sein soll, sind die k -Werte mit fallender Druckhöhe ermittelt worden. Als Probenbehälter wurde der Proctortopf B ($h = 125 \text{ mm}$, $d = 150 \text{ mm}$) gewählt und der hydraulische Überdruck in einem darauf aufgesetzten Standrohr erzeugt. Speziell für das angewendete Prüfverfahren ist der k -Wert anhand nachfolgender Gleichung zu bestimmen:

$$k = \frac{a \cdot l_0}{A \cdot t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{siehe [3-8] S.16})$$

a → Querschnittsfläche des Standrohrs $a = \pi \cdot 0,015^2 = 0,000707 \text{ m}^2$

A → Querschnittsfläche des Probekörpers $A = \pi \cdot 0,075^2 = 0,0177 \text{ m}^2$

l_0 → Höhe des Probekörpers $l_0 = 0,125 \text{ m}$

t → Messzeitspanne

h_1 → Überdruckhöhe am Anfang der Messung

h_2 → Überdruckhöhe am Ende der Messung

Die mit Proctordichte eingebauten Proben wurden nach einer 24-stündigen Wassersättigungsphase in Richtung der Zylinderlängsachse durchströmt. Während der Durchströmungsprozesse befinden sich die Proben vollständig unter Wasser. Als Startgröße wird ein hydrostatischer Druck von 2,0 mWS ($\approx 0,2 \text{ bar}$) gewählt, sodass mit ablaufendem Wasser bei 1,50 mWS, 1,00 mWS, 0,50 mWS und 0,10 mWS Wertepaare händisch erfasst werden. Bei Erreichen der Messpunkte werden jeweils die vergangene Zeit seit Verlassen des vorherigen Messpunktes bzw. des Startpunktes und die zugehörige Wassertemperatur gemessen.

Aufgrund wechselnder Wassertemperaturen in den Versuchen und damit einhergehenden Viskositätsänderungen des Wassers ist es für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erforderlich, alle k -Werte auf 10 °C Wassertemperatur zu beziehen und auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_{10} umzurechnen:

$$k_{10} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,0002 \cdot T^2} \cdot k_T \quad [\text{m/s}] \quad (\text{siehe [3-8] S. 5})$$

T → Wassertemperatur am Messpunkt

k_T → k -Wert bei Wassertemperatur T

Vereinfacht kann der k_{10} -Wert auch auf der Grundlage der Korrekturbeiwerte α aus Tabelle 4.6 bestimmt werden. Zwischenwerte sind dabei geradlinig zu interpolieren.

Temperatur T [°C]	5	10	15	20	25
Korrekturbeiwert α	1,158	1,000	0,874	0,771	0,686

Tab. 4.6 Korrekturbeiwert zur Berücksichtigung der Zähigkeit des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur (siehe [3-8] S. 5)

Der k_{10} -Wert errechnet sich dann wie folgt:

$$k_{10} = \alpha \cdot k_T \quad [-] \quad (\text{siehe [3-8] S. 5})$$

Versuchsergebnisse

Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte sind in den Abbildungen 4.31 und 4.32 ihren zugehörigen Druckgefällebereichen zugeordnet. Sie sind als auf 10 °C Wassertemperatur bezogene k -Werte dargestellt und geben die Durchlässigkeiten des Kiessandes, der alten und jungen MV-Schlacke sowie deren Schlacke-Boden-Gemischen wieder.

Durchlässigkeitsbeiwerte bei 10 °C Wassertemperatur → k ₁₀ -Wert [m/s]			
		Versuch 1	Versuch 2
Kiessand	2,00 m ↓ 1,50 m	5,14·10 ⁻⁰⁵	5,14·10 ⁻⁰⁵
		5,14·10 ⁻⁰⁵	
	1,50 m ↓ 1,00 m	2,99·10 ⁻⁰⁵	2,99·10 ⁻⁰⁵
		2,99·10 ⁻⁰⁵	
	1,00 m ↓ 0,50 m	2,64·10 ⁻⁰⁵	2,64·10 ⁻⁰⁵
		2,64·10 ⁻⁰⁵	
	0,50 m ↓ 0,10 m	2,98·10 ⁻⁰⁵	2,98·10 ⁻⁰⁵
		2,99·10 ⁻⁰⁵	

Abb. 4.31 Durchlässigkeitsbeiwerte des Kiessandes (vgl. Anlage 28)

In den Schlacke-Sand-Gemischen zeigt sich eine Angleichung der Durchlässigkeitsbeiwerte an die des Kiessandes.

Durchlässigkeitsbeiwerte bei 10 °C Wassertemperatur → k_{10} -Wert [m/s]					
		Mehrere Jahre alt		Fünf Wochen alt	
		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 1	Versuch 2
MV-Schlacke	2,00 m	$4,46 \cdot 10^{-06}$	$4,46 \cdot 10^{-06}$	$5,02 \cdot 10^{-08}$	$1,72 \cdot 10^{-08}$
	↓	$4,46 \cdot 10^{-06}$		$3,37 \cdot 10^{-08}$	
	1,50 m	$2,53 \cdot 10^{-06}$	$2,53 \cdot 10^{-06}$	$2,44 \cdot 10^{-08}$	$1,65 \cdot 10^{-08}$
	↓	$2,53 \cdot 10^{-06}$		$2,04 \cdot 10^{-08}$	
	1,00 m	$2,11 \cdot 10^{-06}$	$2,12 \cdot 10^{-06}$	$1,88 \cdot 10^{-08}$	$1,24 \cdot 10^{-08}$
	↓	$2,12 \cdot 10^{-06}$		$1,56 \cdot 10^{-08}$	
	0,50 m	$2,20 \cdot 10^{-06}$	$2,22 \cdot 10^{-06}$	$1,71 \cdot 10^{-08}$	$2,78 \cdot 10^{-08}$
	↓	$2,21 \cdot 10^{-06}$		$2,24 \cdot 10^{-08}$	
MV-Schlacke-Kies-Gemisch	2,00 m	$9,02 \cdot 10^{-08}$	$8,47 \cdot 10^{-08}$	$2,99 \cdot 10^{-07}$	$2,19 \cdot 10^{-07}$
	↓	$8,74 \cdot 10^{-08}$		$2,59 \cdot 10^{-07}$	
	1,50 m	$4,73 \cdot 10^{-08}$	$5,70 \cdot 10^{-08}$	$2,61 \cdot 10^{-07}$	$2,10 \cdot 10^{-07}$
	↓	$5,22 \cdot 10^{-08}$		$2,36 \cdot 10^{-07}$	
	1,00 m	$3,91 \cdot 10^{-08}$	$4,47 \cdot 10^{-08}$	$2,73 \cdot 10^{-07}$	$2,22 \cdot 10^{-07}$
	↓	$4,19 \cdot 10^{-08}$		$2,47 \cdot 10^{-07}$	
	0,50 m	$3,67 \cdot 10^{-08}$	$4,25 \cdot 10^{-08}$	$2,71 \cdot 10^{-07}$	$2,20 \cdot 10^{-07}$
	↓	$3,96 \cdot 10^{-08}$		$2,46 \cdot 10^{-07}$	
MV-Schlacke-Sand-Gemisch	2,00 m	$2,90 \cdot 10^{-05}$	$2,88 \cdot 10^{-05}$	$3,70 \cdot 10^{-05}$	$3,70 \cdot 10^{-05}$
	↓	$2,89 \cdot 10^{-05}$		$3,70 \cdot 10^{-05}$	
	1,50 m	$2,96 \cdot 10^{-05}$	$2,95 \cdot 10^{-05}$	$3,87 \cdot 10^{-05}$	$3,76 \cdot 10^{-05}$
	↓	$2,96 \cdot 10^{-05}$		$3,82 \cdot 10^{-05}$	
	1,00 m	$2,97 \cdot 10^{-05}$	$2,95 \cdot 10^{-05}$	$3,86 \cdot 10^{-05}$	$3,80 \cdot 10^{-05}$
	↓	$2,96 \cdot 10^{-05}$		$3,83 \cdot 10^{-05}$	
	0,50 m	$3,04 \cdot 10^{-05}$	$3,03 \cdot 10^{-05}$	$3,76 \cdot 10^{-05}$	$3,71 \cdot 10^{-05}$
	↓	$3,03 \cdot 10^{-05}$		$3,73 \cdot 10^{-05}$	

Abb. 4.32 Durchlässigkeitsbeiwerte der MV-Schlacken und der MV-Schlacke-Boden-Gemische (vgl. Anlage 29 - 34)

Versuchsauswertung

Wird die hydraulische Leitfähigkeit für einen wassergesättigten Boden (k_f -Wert) auf der Grundlage der definierten Kornverteilung (*Abschnitt 3.2.1*) nach dem Verfahren von Beyer ermittelt, so ergibt sich:

$$k_f = C \cdot d_{10}^2 = 80,0 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3263^2 = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Auch wenn im Vergleich zum k_f -Wert nach Beyer die labortechnisch ermittelten k_{10} -Werte für den untersuchten Kiessand mit $k_{10} \approx 3,0$ bis $5,0 \cdot 10^{-05} \text{ m/s}$ um mehr als eine Zehnerpotenz undurchlässiger ausfallen, sind sie dennoch als plausibel anzusehen, da die Kiessandproben in einem dicht gelagertem Zustand ($D_{Pr} = 100 \%$) geprüft wurden und die nach dem Verfahren von Beyer ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte erfahrungsgemäß auf locker bis mitteldicht gelagerte Böden anzuwenden sind.

Im Vergleich zum Kiessand sind die MV-Schlacken bei gleicher Kornverteilung undurchlässiger. Mit einem k_{10} -Wert von annähernden $2,0$ bis $4,5 \cdot 10^{-06} \text{ m/s}$ liegt die mehrere Jahre alte Schlacke ca. eine Zehnerpotenz unterhalb der hydraulischen Leitfähigkeit des Kiessandes. Die fünf Wochen alte Schlacke ist mit $k_{10} \approx 1,5$ bis $3,5 \cdot 10^{-08} \text{ m/s}$ bis zu drei Zehnerpotenzen undurchlässiger als der untersuchte Kiessand. Auch mit dem Austausch der groben Schlackefractionen durch Kies behalten die Schlacken ihre schwach durchlässigen Eigenschaften ([3-8] S. 3). Eine sich an den Kiessand annähernde, wesentlich höhere Durchlässigkeit wurde erst mit dem Austausch der feineren Schlackekörner durch Sand erzielt. Im MV-Schlacke-Sand-Gemisch der mehrere Jahre alten Schlacke konnten k_{10} -Werte von rund $3,0 \cdot 10^{-05} \text{ m/s}$ und im entsprechenden Gemisch der fünf Wochen alten Schlacke k_{10} -Werte von rund $4,0 \cdot 10^{-05} \text{ m/s}$ ermittelt werden, sodass die Gemische genau wie der Kiessand nach DIN 18130-1:1998-05 als durchlässig einzustufen sind ([3-8] S. 3).

Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich, dass auch bezüglich der Wasserdurchlässigkeit die feineren Schlackekörnungen eigenschaftsbestimmend sind. Wird davon ausgegangen, dass vorrangig die feineren Kornfraktionen, besonders die der jungen MV-Schlacken, das chemische Reaktionsverhalten mit Wasser bestimmen, lässt sich darauf schließen, dass die hydraulischen Eigenschaften zusätzlich durch ihre erhöhte Reaktionsfreudigkeit mit Wasser beeinflusst werden.

Auch wenn die verstärkte chemische Reaktivität mit Wasser von junger Schlacke anhand erhöhter Gefügeverfestigung und wie im Bild 4.1 zu sehen deutlichen Aufquellens von Proben im Proctortopf erkennbar ist, kann ein direkter Zusammenhang zwischen erhöhter Reaktionsfreudigkeit und Durchlässigkeitsverhalten nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden.

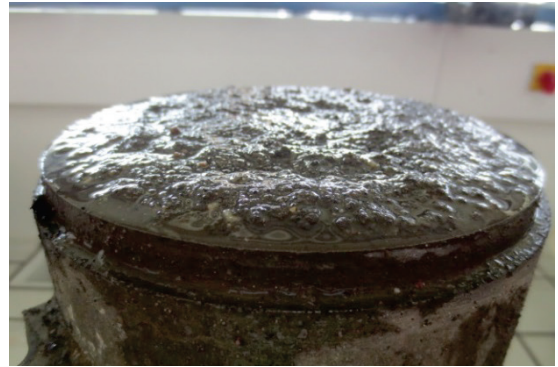


Bild 4.1 Quellen des Schlacke-Kies-Gemisches der fünf Wochen alten MV-Schlacke (eigenes Foto)

Die k_{10} -Werte der reinen MV-Schlacken deuten auf diese Abhängigkeiten lediglich hin.

Ein anderer Ansatzpunkt, die größeren Strömungswiderstände in der MV-Schlacke gegenüber dem reinen Kiessand zu erklären, liegt in der bedingt durch die Verdichtung veränderten Körnungslinie. Die Untersuchung im Abschnitt 4.2.4 auf der Grundlage der Kornverteilungen vor und nach einer Verdichtung im Proctorversuch (Abb. 4.11-1 und Abb. 4.11-2) lässt jedoch lediglich eine Verringerung der Wasserdurchlässigkeit von ca. einer Zehnerpotenz erwarten. Außerdem verringern aus hydraulischer Sicht die größeren Anteile offener Poren (Tab. 4.3) der verdichteten Schlacken und Schlacke-Boden-Gemische den Strömungswiderstand.

Eine plausible Erklärung für die den Wasserdurchfluss hemmende Wirkung der Schlackepartikel liegt in der Schlackekornform bzw. -oberfläche begründet. Durch die klüftige und raue Kornoberfläche verlängert sich der effektive Fließweg des Wassers und es können Turbulenzen sowie Kapillarität im Gefüge auftreten. Ein Aufstellen feiner und feinsten plattiger Körner versperrt zusätzlich die direkten Fließwege, sodass die senkrechte freie laminare Strömung, wie sie im verwendeten Versuchsaufbau das Darcysche Gesetz voraussetzt, zumindest partiell nicht mehr gegeben ist.

Die Filtergeschwindigkeit nach Darcy errechnet sich aus $v = \frac{Q}{A}$ [m/s].

Der k -Wert und die Filtergeschwindigkeit sind in Abhängigkeit vom Strömungsgefälle i über die Beziehung $v = k \cdot i$ zueinander proportional, wodurch sich neben der Filtergeschwindigkeit auch der k -Wert reduziert, sobald sich durch eine Unterbrechung der senkrechten Laminarströmung der Strömungsweg des Wassers um die Bodenkörner herum bei gleichbleibendem hydraulischen Gefälle vergrößert.

4.2.8 Widerstand gegen Frost-Tau-Einflüsse

Versuchsbedingungen

Im Frost-Tau-Versuch nach DIN EN 1367-1:2007-06 [3-13] wurden die bei Atmosphärendruck mit Wasser getränkten Korngemische zehn Temperaturwechseln ausgesetzt, wobei die Proben in einem Temperaturzyklus unter Wasser auf -17,5 °C abgekühlt und anschließend wieder auf 20,0 °C erwärmt wurden. Aufgrund der in den Versuchen zuvor beobachteten ausgeprägten Reaktivität mit Wasser von fünf Wochen alter MV-Schlacke und eines damit verbundenen massiven Verschleißes der Prüfapparaturen über die lange Versuchszeit wurde nur die mehrere Jahre alte MV-Schlacke untersucht.

Durch die Versuchsmethodik, die Verwitterungseigenschaften anhand der Masse von Kornabplatzungen zu definieren, ist der prüffähige Korngrößenbereich der Schlacke auf > 4,0 bis 32,0 mm beschränkt. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingung verliert die Analyse der Schlacke-Boden-Gemische an Aussagekraft, sodass diese im Frost-Tau-Versuch ebenfalls nicht untersucht worden sind. Als Referenz wurden Frost-Tau-Eigenschaften der Kornfraktion > 4,0 bis 32,0 mm des Kiessandes ermittelt. Nach dem Waschen der Schlacke und des Kiessandes wurden ihre zu prüfenden Kornbänder in Einzelproben der Korngrößen > 4,0 bis 8,0 mm, > 8,0 bis 16,0 mm und > 16 bis 32 mm unterteilt, gewässert und zehn Temperaturzyklen dem in Abbildung 4.33 gezeigten Temperaturverlauf ausgesetzt. Zwischen den Zyklen wurden die Proben 5,0 Stunden bei 20,0 °C unter Wasser gelagert.

Nach Beendigung der zehnten Auftauphase wurde die Trockenmasse der Abplatzungen anhand einer Siebung durch ein Normsieb mit der halben Lochweite der jeweiligen unteren Prüfkorngröße prozentual ermittelt.

Der Massenverlust F ergibt sich aus:

$$F = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

M_1 - Probentrockenmasse vor den Frost-Tau-Wechseln

M_2 - Probentrockenmasse der nach Absiebung

(Berechnung des Massenverlustes nach [3-13] S. 8)

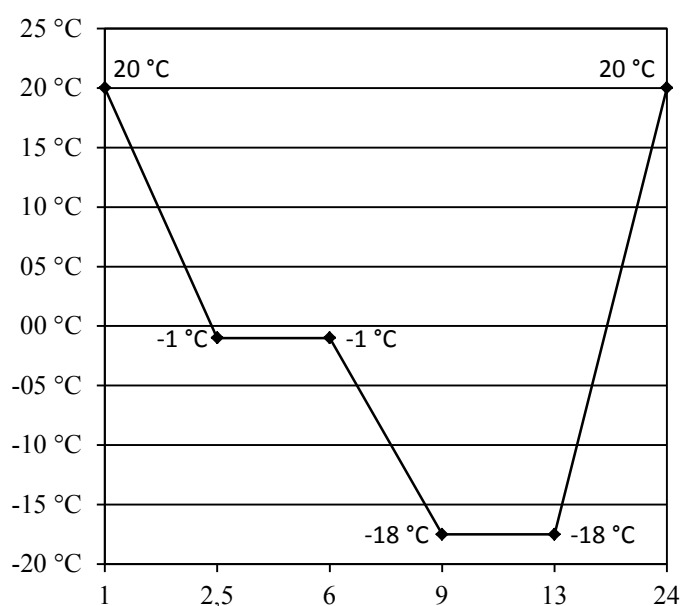


Abb. 4.33 Frost-Tau-Zyklus nach DIN EN 1367-1:2007-06 [3-13] S. 6)

Versuchsergebnisse

In Abbildung 4.34 sind die Masseverluste im Frost-Tau-Wechsel-Versuch der MV-Schlacke den entsprechenden Ergebnissen des Kiessandes gegenübergestellt. Der Ermittlung der Trockenmasseverluste im Korngrößenbereich $> 4,0$ bis $32,0$ mm werden für M_1 die summierten Probenmassen und für M_2 die summierten Masseverluste der Kornfraktionen $> 4,0$ bis $8,0$ mm, $> 8,0$ bis $16,0$ mm und $> 16,0$ bis $32,0$ mm zugrunde gelegt.

Trockenmasseverluste nach 10 Frost-Tau-Wechseln [%]		
Korngrößenbereiche	MV-Schlacke Mehrere Jahre alt	Kiessand
$> 4,0$ mm bis $8,0$ mm	7,86	0,29
$> 8,0$ mm bis $16,0$ mm	7,24	0,18
$> 16,0$ mm bis $32,0$ mm	7,79	0,08
$> 4,0$ mm bis $32,0$ mm	7,61	0,15

Abb. 4.34 Masseverluste aufgrund von Frost-Tau-Beanspruchungen für Körnungsbereiche $> 4,0$ mm bis $32,0$ mm der mehrere Jahre alten MV-Schlacke und des Kiessandes (vgl. Anlage 35 - 36)

Versuchsauswertung

Entsprechend der DIN EN 1367-1:2007-06 [3-13] sind Untersuchungen an jeweils drei Einzelproben für einen Boden ausreichend, um belastbare Ergebnisse erzielen zu können. Zur Minimierung eventueller Werteunsicherheiten bei der Analyse des heterogenen Materials MV-Schlacke wurde diese mit fünf Einzelproben je Korngruppe geprüft. Die Untersuchung dieser Schlackeproben ergibt durchschnittlich einen prozentualen Massenverlust von $\approx 7,5$ % über alle drei Korngrößenbereiche. Im Gegensatz zum Kiessand, bei dem entsprechend ein Verlust von $\approx 0,2$ M.-% festzustellen ist, besitzen die Schlackekörner einen ausgeprägt geringen Frostwiderstand.

In einer Gegenüberstellung mit den Anforderungen in Tabelle 4.7 an natürliche, industriell hergestellte und rezyklierte Gesteinskörnungen der TL Gestein-StB 04 [2-3] und weiterführend der TL SoB-StB2004 [2-2] ist festzustellen, dass bei der Herstellung von gebundenen und ungebundenen Oberbauschichten die untersuchte MV-Schlacke grundsätzlich nicht als Baustoffgemisch verwendet werden darf.

Als Einziges ist eine Verwendung bei einer Überschreitung der Kategorie F₄ einzuräumen, wenn abweichend von der DIN EN 1367-1:2007-06 [3-13] das Kornband > 0,063 bis 32 mm der MV-Schlacke befrosten wird und der dabei entstehende prozentuale Masseverlust durch Korngrößen ≤ 0,063 mm kleiner gleich 2,0 % bleibt sowie die Summe aus ursprünglichem Kornanteil < 0,063 mm und Massenverlust ≤ 9,0 M.-% ist (siehe [2-2] S. 9). Diese Art der Probenaufbereitung und -untersuchung zielt jedoch mehr auf die Bewertung des Frostverhaltens eines Gesamtkorngefüges im Straßenaufbau hin und nicht, wie hier gewollt, auf eine Abschätzung des Frost-Tau-Widerstandes der Partikel an sich. Mit diesem Hintergrund und basierend auf der definiert hergestellten MV-Schlacke-Kornverteilung, deren Kornanteil < 0,063 mm bei 0,04 M.-% liegt, besitzt eine derartige Versuchsmethode nur begrenzte Aussagekraft und die Bewertung der Verwitterungseigenschaften der Körner selbst sowie der Veränderung ihrer klüftig rauen Oberfläche sind nur bedingt möglich.

Frostwiderstand (Verlust in Masse-%)	Kategorie F
≤ 1	F ₁
≤ 2	F ₂
≤ 4	F ₄
> 4	F _{angegeben} ^{a)}
^{a)} Bei MV-Schlacke und RC-Baustoffen gelten zusätzlich die Regelungen der TL SoB-StB, Abschnitte 2.2.1.2 bzw. 2.3.1.2.	

Tab. 4.7 Anforderungen an den Widerstand gegen Frostbeanspruchung nach TL Gestein-StB 04 ([2-3] S. 21)

Die visuelle Bewertung der Schlackekörner bestätigt, dass Frosteinflüsse in Verbindung mit Wasser vorrangig eine Glättung der Kornoberfläche und eine Reduzierung der offenen Poren bewirken und so die Massenverluste maßgeblich aus Abspaltungen an der Oberfläche entstehen. Eine Abrundung der plattigen bzw. kantigen Kornform konnte hingegen nicht festgestellt werden.

Neben dem hier experimentell ermittelten Widerstand von Körnern gegen Frost-Tau-Einflüsse bietet die ZTVE-StB 09 [2-1] eine Eingruppierung von Böden in Frostempfindlichkeitsklassen F1 - F3. Die Einteilung basiert auf der Korngrößenverteilung und ergibt somit für den Kiessand, für die alte und junge Schlacke sowie für deren Gemische mit Sand und Kies die gleiche Frostempfindlichkeitsklasse. Entsprechend der definierten Körnungslinie gehören alle Materialien der Bodengruppe SE an, welche die Frostempfindlichkeitsklasse F1 besitzt und somit als nicht frostempfindlich einzustufen ist ([2-1] S. 24 - 25).

Eine derartige Einstufung steht im Widerspruch zu den Versuchsergebnissen und zeigt, dass bei einer Bewertung der Materialeigenschaften unter Frosteinflüssen von MV-Schlacken und Böden auch die Basis der Einstufungsparameter zu berücksichtigen ist.

4.2.9 MV-Schlacke-Einfluss auf Geokunststoffe und geotechnische Stähle

Versuchsbedingungen

Im Zuge der Analyse wurden zum Ersten Stahlgitterelemente und zum Zweiten Geogitter aus Kunststoff zusammen mit der reaktionsfreudigen fünf Wochen alten MV-Schlacke in ein Wasserbad gelegt, wobei die Gitterelemente, wie die Bilder 4.2 und 4.3 erkennen lassen, in einer Kunststoffschale auf einer ca. 30 mm mächtigen Schicht aus Schlacke lagerten und mit ebenso einer starken Schicht bedeckt worden sind.



Bild 4.2 Einbau Stahlgitterelement
(eigenes Foto)



Bild 4.3 Einbau Geogitter
(eigenes Foto)

Abschließend wurden die Probenpakete mit entionisiertem Wasser gesättigt, das entsprechend Bild 4.4 die obere Schlackeschicht ca. 10 mm überdeckte.

Während der 31-tägigen Lagerung im Wasserbad betrug die Proben- und Umgebungstemperatur konstant 50 °C. Zur Reduzierung der Wasserverdunstung sind die Probenbehälter mit einer in Bild 4.5 zu sehenden Aluminiumfolie bedeckt worden.



Bild 4.4 Gewässerte Probe
(eigenes Foto)

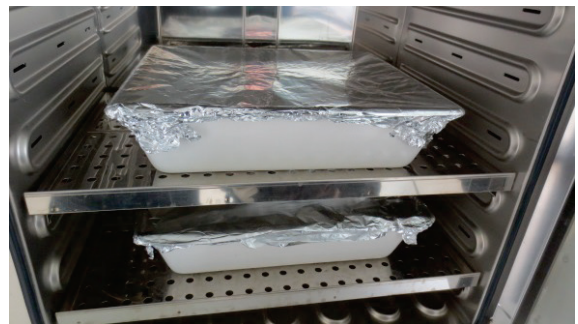


Bild 4.5 Abgedeckte Probe im Ofen bei 50°C
(eigenes Foto)

Bei den beprobten Stahlgitterelementen handelt es sich um punktgeschweißte hochfeste Baustahldrahtgitter mit einer Maschenhöhe von 100 mm und einer Maschenweite von 50 mm sowie einem Drahtdurchmesser von 5 mm. Als Korrosionsschutz besitzt der Stahl eine Beschichtung aus Galfan, einer Zn-Al-Legierung.

Das Kunststoffgeogitter besteht aus Polyethylen mit besonders hoher Dichte (PEHD). Seine Maschengröße beträgt etwa 20 mm x 200 mm. Die Zugfestigkeit des Geogitters beläuft sich auf 55 kN pro Meter Gitterbreite und es ist resistent gegenüber pH-Werten von 2,0 bis 12,5. Im Anschluss an die Wasserbadlagerung wurde in Zugversuchen überprüft, ob sich aufgrund der Schlackeeinwirkung die Festigkeiten der Materialien verändert haben. Als Referenz dienen dafür gleichartige Proben, die jedoch keinen Schlackeeinflüssen ausgesetzt waren. In den Bildern 4.6 und 4.7 sind jeweils durch Schlacke beeinflusste und unbeeinflusste Proben der Stahl- und Kunststoffgitter abgebildet.

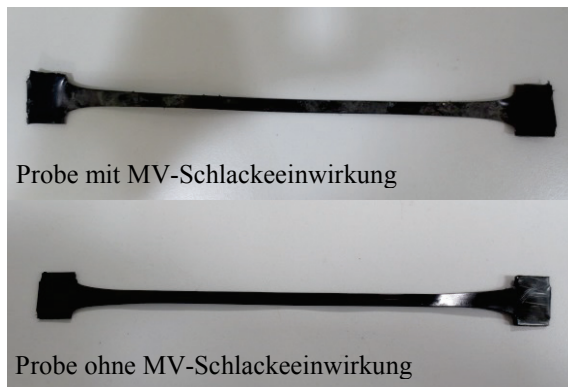


Bild 4.6 Geogitterproben für Zugversuch
(eigenes Foto)

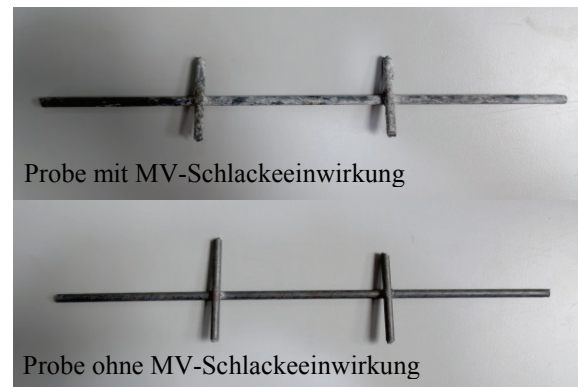


Bild 4.7 Stahlgitterproben für Zugversuch
(eigenes Foto)

Die Stahlgitterproben wurden, wie Bild 4.9 zeigt, nach DIN EN 10002-1:2001-12 [3-16] geprüft, wobei die Geogitter aus Kunststoff in Anlehnung an DIN ISO 10319:1996-06 [3-21] untersucht wurden. Bei letzteren ist entsprechend der Norm der Zugversuch an mindestens 200 mm breiten Streifen durchzuführen [3-21], was im Fall des Geokunststoffgitters bedeutet, dass sich die Zugkräfte auf zehn Gitterstäbe verteilen. Da jedoch mit den vorhandenen Prüfmaschinen eine Untersuchung an 200 mm breiten Proben nicht möglich ist, wurden die in Bild 4.8 zu sehenden Zugversuche an Einzelgitterstäben durchgeführt.



Bild 4.8 Eingespannte Geogitterprobe
(eigenes Foto)



Bild 4.9 Eingespannte Stahlgitterprobe
(eigenes Foto)

Die Stahlgitterproben besitzen eine Länge von 300 mm und einen Durchmesser von 5,0 mm. Ihre Stabdehnung wurde durch separate Messarme erfasst, sodass hier die Einspannlängen nicht weiter zu berücksichtigen waren. Die Probengesamtlängen der Kunststoffgeogitterproben betragen 250 mm. In der Probenmitte belaufen sich ihre Breiten auf 6,75 mm und ihre Dicken auf 1,0 mm. An den Enden ist das Probenmaterial auf 17,5 mm Länge 23,0 mm breit und 2,0 mm dick. Die verstärkten Endzonen dienen der Prüfkörpereinspannung und waren somit nicht bei der Bestimmung der Dehnung einzubeziehen. Die Abmessungen der Kunststoffgeogitterproben unterliegen herstellungsbedingt leichten Abweichungen.

Es sind sowohl von der Stahlgittern wie auch von den Kunststoffgeogittern jeweils fünf Proben mit und fünf Proben ohne Schlackeeinwirkung im Zugversuch getestet worden.

Versuchsergebnisse

Unmittelbar vor dem Ausbau der Kunststoffgeogitter- und Stahlgitterproben aus den Wasserbadbehältern wird der pH-Wert des Wassers mit Indikatorpapier gemessen. Alle Messungen ergeben annähernd einen **pH-Wert = 8,0**.

Die prozentuale Veränderung in den Abbildungen 4.35 und 4.36 beschreibt die jeweilige Werteabnahme bzw. den jeweiligen Wertezuwachs, der durch den Schlackeeinfluss hervorgerufen wird, in Bezug auf die Materialparameter ohne Schlackeeinwirkung.

Mittlere Materialkennwerte der Stahlgitterproben

Gemittelt aus jeweils 5 Zugversuchen

		Ohne MVS-Einwirkung	Mit MVS-Einwirkung	Prozentuale Veränderung
Nominelle Zugfestigkeit	R_m [N/mm ²]	696,98	695,64	0,19 %
Gleichmaß- dehnung	A_{gt} [%]	3,58	3,11	13,13 %

Abb. 4.35 Materialkennwerte aus dem Zugversuch der Stahlgitterproben (vgl. Anlage 37)

Mittlere Materialkennwerte der Kunststoffgeogitterproben

Gemittelt aus jeweils 5 Zugversuchen

		Ohne MVS-Einwirkung	Mit MVS-Einwirkung	Prozentuale Veränderung
Nominelle Zugfestigkeit	a_f [kN/m]	47,46	47,90	0,93 %
Höchstzugkraft- dehnung	ϵ [%]	23,89	23,98	0,38 %

Abb. 4.36 Materialkennwerte aus dem Zugversuch der Kunststoffgeogitterproben (vgl. Anlage 38)

Versuchsauswertung

Anhand der Messergebnisse wird ersichtlich, dass die vollständig mit Wasser überdeckte fünf Wochen alte MV-Schlacke bei 31-tägiger Einwirkzeit einen nur sehr geringen Einfluss auf die Materialeigenschaften sowohl der Stahlgitter wie auch der Kunststoffgeogitter hat. Lediglich ist eine Reduzierung der gemessenen Dehnungen der Stahlstäbe durch den Schlackeeinfluss festzustellen.

Inwieweit MV-Schlacke die Probematerialien über einen längeren Zeitraum beeinflusst, kann auf der Grundlage der Versuchsergebnisse nicht abgeschätzt werden. Es ist jedoch angesichts des in den Bildern 4.6 und 4.7 sichtbaren Angriffs der Probenoberflächen durch Schlackeeinhaltsstoffe bereits nach 31 Tagen anzunehmen, dass die Schlacke eine Verwitterung von Stahl und Kunststoffen forciert. Ein diese Annahme bekräftigendes Indiz ist die in den Bildern 4.10 und 4.11 veranschaulichte Lochfraßkorrosion der Aluminiumfolie, mit der die Probenbehälter im Wärmeschrank abgedeckt waren. Sie tritt unabhängig davon, welche Gitterproben sich in den Behältern befinden, an den Kontaktpunkten zwischen Folie und basischem Wasser auf. Durch die so entstandenen Löcher verdunstete die basische Lösung und hinterließ kristalline Rückstände. Ebenso wie es am Beispiel der Aluminiumfolie zu sehen ist, kann sich unter Mitwirkung bestimmter Schlackeeinhaltsstoffe auch die Korrosion metallischer Geotechnik-konstruktionen erheblich verstärken.



Bild 4.10 Korrosion der Aluminiumfolie
(eigenes Foto)



Bild 4.11 Lochfraß/kristalline Rückstände
(eigenes Foto)

4.2.10 Raumbeständigkeit in Abhängigkeit vom Schlackealter

Versuchsbedingungen

Entgegen dem Versuchsaufbau in Bild 4.12 zur Bewertung der Raumbeständigkeit von Müllverbrennungsschlacke nach Merkblatt M HMVA [2-4], der als Hebeversuch eine einaxiale Dehnung der Probekörper erfasst, wurden entsprechend Bild 4.13 die mehrere Jahre alte und die fünf Wochen alte MV-Schlacke in einer Triaxialzelle untersucht, um dreidimensional die Ausdehnungen der Schlacke erfassen zu können.

Während des Versuches befinden sich die Schlackeproben bei vollständiger Wassersättigung in einem 50 °C warmen Milieu und der die Probe umgebende Triaxialzellendruck wird konstant auf 5,0 kN/m² gehalten. Die zylindrischen Probekörper sind 200 mm hoch und besitzen einen Durchmesser von 100 mm. Ihr Ausdehnen wird durch Messen des ausströmenden Zellenwassers aus der Triaxialzelle erfasst.

Ermittlung des Zelldrucks:

Nach Merkblatt M HMVA ist ein möglicher Anwendungsbereich für MV-Schlacke die Frostschutzschicht in Straßen der Bauklassen III ([2-4] S. 11), deren Asphalttragschicht nach RStO 2001 eine Stärke von $d \approx 0,22$ m besitzt.

Wichte Asphaltbeton:

$$\gamma_{AC} = 24,0 \text{ kN/m}^3$$

Spannung in der Frostschutzschicht aus darüber liegender Asphalttragschicht:

$$\sigma_{AC} = \gamma_{AC} \cdot d = 24,0 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,22 \text{ m}$$

$$\underline{\underline{\sigma_{AC} \approx 5,0 \text{ kN/m}^2}}$$

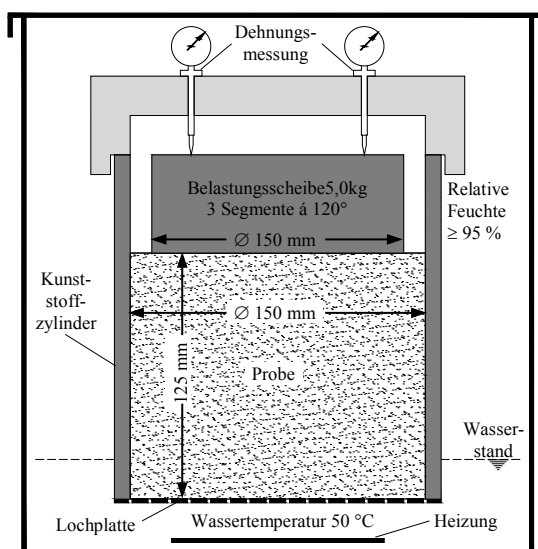


Bild 4.12 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Raumbeständigkeit nach M HMVA ([2-4] S. 22)

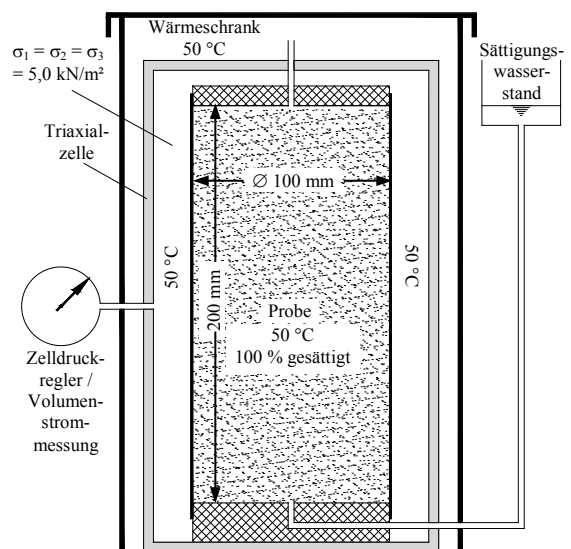


Bild 4.13 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Raumbeständigkeit in der Triaxialzelle (eigene Grafik)

Nach dem händischen Einbau des feuchten Probenmaterials mit 100% der Proctordichte in die Triaxialzelle werden die Probekörper zur Konsolidation und Drainage mit einem Zelldruck von 20 kN/m^2 solange belastet, bis alle Volumenänderungen abgeschlossen sind, jedoch mindestens 12 Stunden. In dieser Zeit werden die Proben vollständig mit Wasser gesättigt. Im Anschluss, nach Reduzierung des Zelldrucks auf $5,0 \text{ kN/m}^2$, werden die eigentlichen Messungen zur Raumbeständigkeit in einem Messzeitraum von 20 Tagen durchgeführt.

Die Bilder 4.14 bis 4.16 dokumentieren einzelne Phasen des Probeneinbaus. Das Probenmaterial wird durch eine zweilagige Latexhülle vom probenumgebenden Wasser in der Triaxialzelle getrennt. Bei der üblichen Verwendung nur einer Latexlage besteht die Gefahr, dass diese durch scharfkantige Schlackepartikel zerstört wird.

Zur Aufrechterhaltung der Umgebungstemperatur von 50 °C wird die Triaxialzelle während der Versuchsdauer in einem regelbaren Wärmeschrank deponiert.

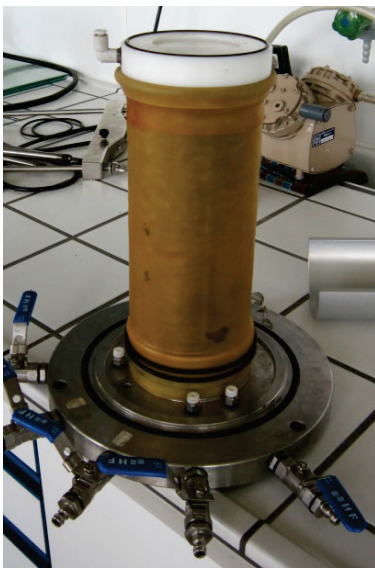


Bild 4.14
Probe in Latexhülle eingebaut
(eigenes Foto)



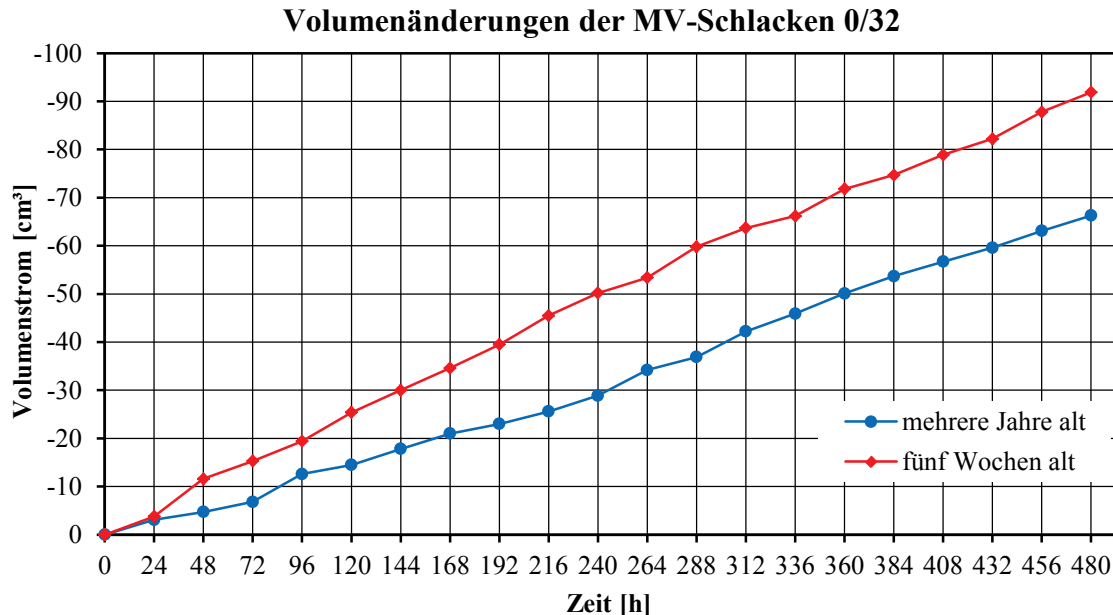
Bild 4.15
Geschlossene Triaxialzelle
(eigenes Foto)



Bild 4.16
Befüllen der Triaxialzelle im
Wärmeschrank (eigenes Foto)

Versuchsergebnisse

Die Abbildung 4.37 visualisiert den Volumenzuwachs der voll mit Wasser gesättigten Schlackeproben in der Triaxialzelle über einen Zeitraum von 20 Tagen. Als Messgröße wird dabei der zeitabhängig kumulierte Volumenstrom des Wassers verwendet, das aufgrund der Probenvergrößerung aus der Triaxialzelle verdrängt wird.



Durchschnittlicher Volumenstrom pro Tag	
Mehrere Jahre alte MV-Schlacke: -3,30 cm³	Fünf Wochen alte MV-Schlacke: -4,60 cm³

Abb. 4.37 Volumenänderungen mehrerer Jahre und fünf Wochen alter MV-Schlacke
(siehe auch Anlage 39)

Versuchsauswertung

Das Vorhandensein von Schlackereaktionen mit Wasser wird im Bild 4.19 verdeutlicht. An beiden analysierten MV-Schlacken ist eine Volumenvergrößerung erkennbar, die im Fall der fünf Wochen alten Schlacke über die 20 Tage Betrachtungszeitraum größer ausfällt. Das zeigt, dass volumenvergrößernde Reaktionen mit zunehmendem Schlackealter zwar geringer werden, aber selbst nach mehreren Jahren noch nicht vollständig abgeklungen sind. In dem Zusammenhang sind jedoch nicht nur die Alterungszeiträume maßgebend, sondern auch die Alterungsbedingungen zu berücksichtigen. Neben Luft ist auch die Menge an zugeführtem Wasser während der Alterung entscheidend. Die noch auftretenden volumenvergrößernden Reaktionen mit Wasser der mehrere Jahre alten Schlacke können somit auch darauf zurückgeführt werden, dass die Schlacke überwiegend in trockener Umgebung gelagert worden ist.

Mit Beginn der Messungen treten in der jungen wie auch in der alten Schlacke die wasserabhängigen Reaktionen mit gleicher Intensität auf. Nach 24 Stunden setzt in der fünf Wochen alten Schlacke durch ihre höhere Reaktionsfreudigkeit eine verstärkte Expansion des Probekörpers ein, wohingegen die Volumenzunahme der mehrere Jahre alten Schlacke annähernd konstant bleibt. Aufgrund dessen, dass sich die Volumenzuwächse bei einem umgebenden Druck von 5,0 kN/m² ergeben, kann davon ausgegangen werden, dass beide Schlacken das Potential in sich tragen, Bauwerksschäden bei Belastungen $\leq 5,0$ kN/m² hervorzurufen. Die im Merkblatt M HMVA zulässige maximale Ausdehnung von 3,0 ‰ nach 30 Tagen bzw. 5,0 ‰ nach 120 Tagen wird, wie in Tabelle 4.8 zu sehen ist, von beiden Schlacken bereits in weniger als 4 Tagen überschritten.

Kennwerte zur Raumbeständigkeit der MV-Schlacken		
Alter der MV-Schlacke	Mehrere Jahre alt	Fünf Wochen alt
Anfangsvolumen [cm ³]	1570,80	1570,80
Volumen nach 20 Tagen [cm ³]	1637,10	1662,70
Volumenänderung [cm ³]	66,30	91,90
Volumenänderung [%]	4,22	5,85
Erreichen der 3,0 ‰ - Grenze nach:	48 Std. 09 Min.	26 Std. 48 Min.
Erreichen der 5,0 ‰ - Grenze nach:	76 Std. 22 Min.	36 Std. 29 Min.

Tab. 4.8 Raumbeständigkeitskennwerte der fünf Wochen und mehrere Jahre alten MV-Schlacke

Neben der Volumenzunahme verfestigt sich das Korngefüge der jungen Schlacke während des Versuches so, dass der Probekörper nach dem Ausbau aus der Triaxialzelle seine zylindrische Form komplett beibehält, während die Probe der mehrere Jahre alten Schlacke sofort beim Abrollen der Latexhülle zerfällt. Der Unterschied zwischen den Probekörpern der jungen und alten Schlacke nach dem Ausbau ist in den Bildern 4.17 und 4.18 zu erkennen.



Bild 4.17
Probe der fünf Wochen alten MV-Schlacke nach dem Ausbau
(eigenes Foto)



Bild 4.18
Probe der mehrere Jahre alten MV-Schlacke nach dem Ausbau
(eigenes Foto)



Bild 4.19
Korrosionsrückstände der MV-Schlacke auf der Latexhülle
(eigenes Foto)

Zudem bildeten sich an der ausgebauten, noch feuchten jungen MV-Schlacke die im Bild 4.20 zu sehenden Bläschen, die später aushärteten. Diese sich bei Trocknung verfestigenden Schlackeeinhaltsstoffe traten, wie in den Bildern 4.21 bis 4.22 erkennbar ist, bereits während des Versuches am Sättigungskontrollröhrchen aus und sind den kristallinen Rückständen in den Versuchen zur Beurteilung des Einflusses von MV-Schlacke auf Geokunststoffe und geotechnische Stähle (*Abschnitt 4.2.9*) sehr ähnlich.



Bild 4.20
Bläschenbildung am Probekörper
der fünf Wochen alten
MV-Schlacke (*eigenes Foto*)



Bild 4.21
Kristalliner Ausfall aus dem Sättigungswasser am Kontrollröhrchen
(*eigene Fotos*)



Bild 4.22
Kristalliner Ausfall aus dem Sättigungswasser am Kontrollröhrchen
(*eigene Fotos*)

4.3 Validität geotechnischer MV-Schlacke-Kennwerte

MV-Schlacken sind, sofern sie keine gefährlichen Stoffe enthalten, nach der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis [1-3] als Abfall mit dem Abfallschlüssel 190112 einzustufen (*siehe [1-3] S. 26*).

Bereits in der Vergangenheit wurde vorrangig für den Deponiebau versucht, für Abfälle äquivalente Kennwerte zu mechanischen Eigenschaften von Böden zu finden. Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung von Abfällen und ihrer im Verhältnis zu Böden hohen Anteile an organischen und anorganischen Substanzen sind die hierbei meist mit Versuchsmethoden aus der Bodenmechanik ermittelten Abfalleigenschaften hinsichtlich ihrer Plausibilität, ihrer globalen Übertragbarkeit auf eine größere Kubatur und in Bezug auf ihre Dauerhaftigkeit kritisch zu bewerten, wobei besonders die Kompatibilität zwischen zu analysierendem Material und der Prüfapparatur mit einzubeziehen ist.

Speziell für MV-Schlacken in Verbindung mit Wasser konnte während der durchgeführten Versuche grundlegend eine aggressive korrosionsbeschleunigende Wirkung auf die Laborgeräte beobachtet werden, was bei langen Versuchszeiten zu verfälschten Messgrößen bis hin zur Zerstörung der Messgeräte führen kann.

Auch existieren keine gezielten Erfahrungswerte zur Probenaufbereitung. So ist beispielsweise nicht eindeutig geklärt, in welchem Maße mit offensichtlich ergebnisbeeinflussenden, jedoch nur in geringer Anzahl bis einmalig in der Probe vorhandenen festen Bestandteilen umzugehen ist. Als Beispiel für derartige Schlackeeinhalte sind Drähte, Schrauben und Löffel (*Bild 3.3*) wie auch große Holz- und Papierreste (*Bild 3.1 und Bild 3.2*) zu nennen.

Neben der Analysemethodik selbst sind die dauerhafte Beständigkeit von bodenmechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Schlacken und deren Repräsentanz für größere Materialmengen oder andere Chargen Fragestellungen einer sicheren geotechnischen Bewertung.

Im Gegensatz zu Böden ist davon auszugehen, dass MV-Schlacken aufgrund ihrer Inhomogenität großen Kennwertschwankungen unterliegen, was zum einen ein Zurückgreifen auf Erfahrungswerte, wie es bei Böden durchaus praktiziert wird, unmöglich macht und zum anderen große Unsicherheiten bei der Übertragung von Laborwerten auf die für Baumaßnahmen erforderlichen Mengen hervorruft. Eine Kompensation solcher Schwankungen ist nur durch eine Erhöhung der Versuchsanzahl möglich, wobei eine Sicherheit, wie sie bei Böden erreicht werden kann, unrealistisch bleibt.

Auch im Hinblick auf kennwertverändernde Materialveränderungen ist bei den Schlacken von deutlich markanteren Umwandlungsprozessen in wesentlich geringeren Zeiträumen als bei Böden auszugehen, was die Verwendung der Schlacken in Bauwerken mit langzeitlichem Bestand einschränkt.

Bei direktem Bezug auf die durchgeführten Laborversuche konnten folgende Problematiken speziell zur geotechnischen Schlackecharakterisierung festgestellt werden.

- Die Ermittlung des Glühverlustes, welcher in der Bodenmechanik den organischen Anteil von Böden definiert, ist in ihrer Form für MV-Schlacke ungeeignet, da beim Glühen der Schlacke mehr als organische Bestandteile verbrannt werden.
- Im Verlauf der Siebanalyse kam es auf den Sieben kleiner 4,0 mm zu Verfilzungen mit Korneinschlüssen, sodass ein geringer Kornanteil nicht fraktioniert wurde. Die Siebe kleiner 2,0 mm verstopften verstärkt, was wiederum den Siebdurchgang einschränkte. Mit händischen Zwischensiebungen und Reduzierung der Probenmengen konnten die Siebverstopfungen zwar verringert, jedoch nicht gänzlich verhindert werden.

Auch eine Nasssiebung würde in diesem Fall nicht zum Erfolg führen, da Quellprozesse in der Schlacke die Siebe zusätzlich verschließen würden und dadurch austretendes Wasser Probenmaterial ausspülen könnte. Weiter waren bei der massenprozentualen Auswertung der Siebrückstände die korngrößenabhängigen Korndichten zu berücksichtigen. Eine Fraktionierung der Korngrößen $< 0,063$ mm durch Sedimentation ist für MV-Schlacke nicht möglich, da Schlackepartikel mit einer Dichte kleiner $1,0 \text{ g/cm}^3$ in der Suspension nicht absinken.

- Beim Proctorversuch ist davon auszugehen, dass durch das für den Versuch erforderliche Wasser die Ergebnisse verfälscht werden, da es durch chemische Reaktionen teilweise dauerhaft in der Schlacke gebunden wird und somit den ermittelten Wassergehalt reduziert. Verstärkt werden die Versuchsungenauigkeiten durch eine Kornzertrümmerung im Verdichtungsprozess und die Inhomogenität von Einzelproben. Zwar wird der Einfluss der Kornzertrümmerung reduziert, wenn für jeden Einzelversuch frisches Probenmaterial verwendet wird, doch nimmt bei dieser Herangehensweise die Wirkung der Schlackeheterogenität zu.
- Wie im Proctorversuch vermag der unabdingbare Kontakt zwischen MV-Schlacke und Wasser auch im Durchlässigkeitsversuch die Resultate zu verfälschen. Gerade bei jungen reaktionsfreudigen MV-Schlacken treten hier vermehrt verfestigende und abdichtende Prozesse auf, die beispielsweise auch die Steifemoduln in Drucksetzungsuntersuchungen an feuchter MV-Schlacke erhöhen würden.
- Die über einen längeren Zeitraum in feuchtwarmem Milieu andauernden Versuche zur Raumbeständigkeit stellen eine extreme Korrosionsbelastung für die Messgeräte dar und können so, aufgrund defekter Mess- und Regeleinheiten, falsche Werte liefern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass nicht alle Versuchsmethoden der Geotechnik auch für eine bodenmechanische Charakterisierung von MV-Schlacke geeignet sind. Besonders Untersuchungen in Verbindung mit Wasser steigern das Fehlerpotenzial, das demnach vor einer MV-Schlacke-Analyse in jedem Fall abzuschätzen und zu bewerten ist.

4.4 Gleichwertigkeit von MV-Schlacke und gewachsenem Boden

Eine geotechnische Beurteilung verschiedener Böden im Zusammenhang mit der Bewertung ihrer Gleichwertigkeit ist grundsätzlich anhand einschlägiger Bodenkennwerte vorzunehmen. Dahingehend ist es auch für einen erdbautechnischen Vergleich zwischen Böden und einem potentiellen Recyclingbaustoff wie der MV-Schlacke sinnvoll, eben diese Kenngrößen heranzuziehen. Für die untersuchten MV-Schlacken wird im Folgenden in den Abbildungen 4.38-1 und 4.38-2 ein Bezug zum vergleichend analysierten Kiessand mit gleicher Körnungslinie hergestellt, in dem ausgewählte Bodenkenngrößen der Schlacken ins Verhältnis zu äquivalenten Kiessandwerten gesetzt werden.

Ausgewählte geotechnische Kenngrößen der MV-Schlacken 0-32 mm im Vergleich zum Kiessand 0-32 mm					
Kennwerte		Abweichung zwischen Kiessand und MV-Schlacke			
		Mehrere Jahre alte Schlacke		Fünf Wochen alte Schlacke	
		Globaler Unterschied	Differenz	Globaler Unterschied	Differenz
		[g/cm ³]		[g/cm ³]	
Korndichte ρ_s	>4-32 mm	$\rho_{s, \text{Kiessand}} > \rho_{s, \text{Schlacke}}$	0,07	$\rho_{s, \text{Kiessand}} > \rho_{s, \text{Schlacke}}$	0,09
	0-4 mm	$\rho_{s, \text{Kiessand}} < \rho_{s, \text{Schlacke}}$	0,09	$\rho_{s, \text{Kiessand}} < \rho_{s, \text{Schlacke}}$	0,08
		[g/cm ³]		[g/cm ³]	
Proctordichte ρ_{Pr}		$\rho_{Pr, \text{Kiessand}} > \rho_{Pr, \text{Schlacke}}$	0,406	$\rho_{Pr, \text{Kiessand}} > \rho_{Pr, \text{Schlacke}}$	0,306
		[%]		[%]	
optimaler Wassergehalt w_{Pr}		$w_{Pr, \text{Kiessand}} < w_{Pr, \text{Schlacke}}$	12,8	$w_{Pr, \text{Kiessand}} < w_{Pr, \text{Schlacke}}$	9,40
		[MN/m ²]		[MN/m ²]	
Steife- modul E_s	Erstbel. 50 kN/m ²	$E_{s, \text{Kiessand}} > E_{s, \text{Schlacke}}$	109,4	$E_{s, \text{Kiessand}} > E_{s, \text{Schlacke}}$	109,4
	100 kN/m ²		149,5		113,3
	200 kN/m ²		251,9		238,7
	400 kN/m ²		327,2		224,4
	Zweitbel. 100 kN/m ²		539,6		668,1
	200 kN/m ²		539,6		678,2
	400 kN/m ²		325,2		383,1
		[%]		[%]	
Stauchung ε	Erstbel. 50 kN/m ²	$\varepsilon_{\text{Kiessand}} < \varepsilon_{\text{Schlacke}}$	0,969	$\varepsilon_{\text{Kiessand}} < \varepsilon_{\text{Schlacke}}$	0,975
	100 kN/m ²		1,413		1,050
	200 kN/m ²		2,050		1,368
	400 kN/m ²		2,694		1,900
	Entlast. 200 kN/m ²		2,707		1,857
	100 kN/m ²		2,656		1,787
	50 kN/m ²		2,632		1,732
	Zweitbel. 100 kN/m ²		2,643		1,762
	200 kN/m ²		2,669		1,831
	400 kN/m ²		2,725		1,925

Abb. 4.38-1 Divergenz zwischen geotechnischen Kenngrößen der MV-Schlacken und des Kiessandes (eigene Abbildung)

Ausgewählte geotechnische Kenngrößen der MV-Schlacken 0-32 mm im Vergleich zum Kiessand 0-32 mm				
Kennwerte	Abweichung zwischen Kiessand und MV-Schlacke			
	Mehrere Jahre alte Schlacke		Fünf Wochen alte Schlacke	
	Globaler Unterschied	Differenz	Globaler Unterschied	Differenz
		[°]		[°]
Innerer Reibungswinkel φ'	$\varphi'_{\text{Kiessand}} < \varphi'_{\text{Schlacke}}$	9,0	$\varphi'_{\text{Kiessand}} < \varphi'_{\text{Schlacke}}$	11,3
		[kN/m ²]		[kN/m ²]
Kohäsion c'	$c'_{\text{Kiessand}} < c'_{\text{Schlacke}}$	11,4	$c'_{\text{Kiessand}} < c'_{\text{Schlacke}}$	11,2
		[m/s]		[m/s]
k_{10} -Wert	2,0-1,5 m	$k_{10, \text{Kiessand}} > k_{10, \text{Schlacke}}$	$k_{10, \text{Kiessand}} > k_{10, \text{Schlacke}}$	$4,69 \cdot 10^{-05}$
	1,5-1,0 m			$5,14 \cdot 10^{-05}$
	1,0-0,5 m			$2,74 \cdot 10^{-05}$
	0,5-0,1 m			$2,43 \cdot 10^{-05}$
				$2,77 \cdot 10^{-05}$
		[%]		[%]
Trockenmasse- verluste nach 10 Frost-Tauch- Wechseln	>4-8 mm	$\text{Kiessand} < \text{Schlacke}$		7,57
	>8-16 mm			–
	>16-32 mm			7,06
				7,71
				–

Abb. 4.38-2 Divergenz zwischen weiteren geotechnischen Kenngrößen der MV-Schlacken und des Kiessandes (eigene Abbildung)

Bodenmechanische Kenngrößen natürlicher Böden werden neben anderen Faktoren grundlegend von deren Korngrößenverteilung beeinflusst. Für gewachsene Böden mit ähnlicher Körnungslinie kann in Abhängigkeit von deren Lagerungsdichte beispielsweise ein annähernd gleiches Scherverhalten, Verdichtungsverhalten, Druck-Setzungs-Verhalten und Durchströmungsverhalten angenommen werden. Dem entgegen verdeutlichen die Versuchsergebnisse, dass trotz gleicher Kornverteilung, ähnlicher Korndichte und einem Verdichtungsgrad von 100 % der Proctordichte nicht zu vernachlässigende Differenzen zwischen Kiessand- und Schlackeeigenschaften auftreten. Eine korrelative Übertragung bodenmechanischer Eigenschaften von Böden auf MV-Schlacke oder sogar zwischen MV-Schlacken untereinander ist demnach nicht möglich. Selbst bei verschiedenen Chargen der gleichen Schlacke ist eine Gleichbehandlung hinsichtlich ihres mechanischen Verhaltens generell zu prüfen.

Werden gezielt die Ergebnisse des Kompressionsversuches betrachtet, zeigt sich, dass mit steigender Belastung auch die Differenzen zwischen Schlacke- und Kiessandstauchungen anwachsen, wobei 11 bis 20-fach größere Stauchungen in den Schlackeproben gemessen worden sind. Entsprechend geringer fallen demzufolge die Steifemoduln der Schlacke aus. Die erheblichen Unterschiede verdeutlichen das eminent schlechtere Setzungsverhalten der Schlacke gegenüber dem Kiessand bei Belastungen ab 50 kN/m².

Unterhalb dieser Belastungsstufe ist davon auszugehen, dass sich die Setzungsunterschiede zwar relativieren, jedoch nie gänzlich auszuschließen sind.

Ähnlich deutliche Unterschiede wurden beim für das Erreichen der Proctordichte erforderlichen optimalen Wassergehalt festgestellt. Der prozentuale Wasseranteil im Schlackekorngefüge erreicht hier annähernd den dreifachen Wert des Kiessandes. Die Proctordichte der Schlacke ist dabei nur leicht geringer als die des Kiessandes. Im Reibungsverhalten konnten für die Schlacken erdstatisch höhere Werte als für den geprüften Boden ermittelt werden, wobei hier besonders die Kohäsionswerte mit Rücksicht auf Varianzen in der stofflichen Schlackezusammensetzung und langzeitlichen eigenschafts-verändernden Schlackereaktionen anzuwenden sind.

Die Durchströmungseigenschaften von Korngerüsten sind in erster Linie von deren massenprozentualen Korngrößenanteilen und der Lagerungsdichte abhängig. Auch wenn der Kiessand und die Schlacke eine gleiche Kornverteilungen besitzen, unterschreiten die k_{10} -Werte der Schlacken die des untersuchten Bodens partiell um mehr als drei Zehnerpotenzen.

Angesichts der markanten Kennwertunterschiede zwischen Schlacke und Kiessand sowie zwischen den beiden geprüften Schlacken selbst kann die MV-Schlacke einem Boden aus erdstatischer und hydraulischer Sicht nicht gleichgesetzt werden.

Hinzu kommt, dass sich die Schlacken aufgrund ihrer merklichen Anteile an organischen und anorganischen Substanzen durch Umwelteinflüsse verstärkt umwandeln, wodurch zu erwarten ist, dass sich die hydraulischen und bodenmechanischen Kennwerte der Schlacken über einen längeren Zeitraum gesehen in höherem Maße verändern, als das erfahrungsgemäß bei Böden der Fall ist. Durch eine heterogene Schlackezusammensetzung werden diese undefinierbaren Veränderungen zusätzlich forciert.

Kapitel 5

Praxisaspekte der geotechnischen Analyse und Anwendung

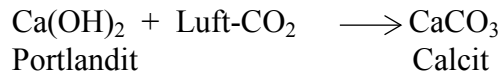
5.1 Bau- und labortechnische Grenzen

5.1.1 Bautechnische Gesichtspunkte

Die Reduzierung bzw. Vermeidung von Bauwerksschäden betreffend, ist das im Voraus zu beurteilende Setzungsverhalten eine der wesentlichsten Bodencharakteristiken. Bereits in der Bauwerksplanung ist es erforderlich, die Art und das Ausmaß von Setzungen in die konstruktive Durchbildung und die damit verbundenen statischen Analysen einfließen zu lassen. Eine höchstmögliche Planungssicherheit wird hierbei durch eine präzise Definition der über die Nutzungszeit des Bauwerks auftretenden Randbedingungen erzielt. Die MV-Schlacken bieten dahingehend durch ihr oft unbekanntes Langzeitverhalten und ihre inhomogene Zusammensetzung ein gewisses Maß der Unsicherheit. Speziell Umwandlungs- und Zersetzungsprozesse in den MV-Schlacken werden deren geotechnische Eigenschaften über durchaus realistische Nutzungszeiten von 50 Jahren und mehr verändern. Selbst eine bisher als ausreichend erachtete Ablagerung von drei Monaten vor Verwendung der Schlacke ([2-5] S. 5 und [2-3] S. 10) garantiert nicht, dass jegliche Schlackereaktivität eliminiert worden ist. Dies manifestieren auch die Ergebnisse der Raumbeständigkeitsuntersuchung der mehrere Jahre alten Schlacke. Durch die in den Versuchen beobachteten Treiberscheinungen, können zeitabhängige Bauschäden verursacht werden. Auch wenn mit fortschreitender Schlackealterung die Reaktionen abklingen, kann im Vorfeld nicht abschließend ein genauer Zeitpunkt festgelegt werden, an dem sie nicht mehr schadhaft auf Bauwerke wirken. Fest steht jedoch, dass die treibenden Kräfte der untersuchten jungen und sogar der mehrere Jahre alten Schlacke eine Spannung von 5,0 kN/m² überschreiten, der beispielsweise Fahrbahntragschichten unter Umständen nicht widerstehen können.

Die Alteration und die Raumbeständigkeit sind vor allem vom Verlauf der Carbonatisierungs- und Sulfatreaktionen in den MV-Schlacken abhängig ([4-2] S. 4). Sie beginnen mit Entstehen der Schlacke, laufen vorrangig in den ersten Wochen der Schlackealterung ab und reduzieren sich in für jede Schlacke spezifisch langen Zeiträumen (*ebd.*).

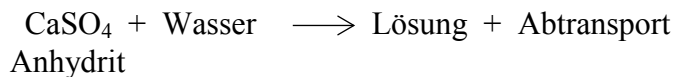
Die Carbonatisierung ist die Reaktion des Portlandits mit dem Luft-CO₂ zu Calcit, der grundsätzlich eine verfestigende Wirkung auf die Schlackeeinhalte hat und besonders die feineren Kornfraktionen bindet ([4-2] S. 5).



([4-2] S. 5)

Mit vollständigem Abschluss der Carbonatisierungsreaktionen erhält man eine reaktionsträge MV-Schlacke mit gesteigertem mechanischem Widerstand ([4-2] S. 5).

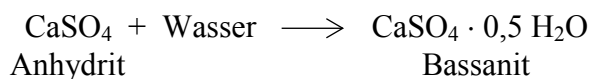
Die Raumbeständigkeit einer MV-Schlacke wird hingegen im Wesentlichen durch Sulfatreaktionen bestimmt (*ebd.*). Der Gehalt des wasserfreien Anhydrits regelt dabei die Reaktion im Zuge der Alteration (*ebd.*). In Verbindung mit Wasser kann Anhydrit aufgelöst oder zu wasserhaltigen Sulfatphasen umgewandelt werden, wobei letztere Volumenänderungen der Schlacke nach sich ziehen (*ebd.*).



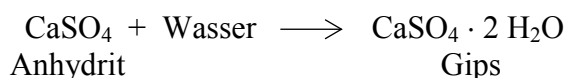
([4-2] S. 5)

Durch den Abtransport des in Lösung gegangenen Anhydrits steht es für volumenvergrößernde Reaktionen nicht mehr zur Verfügung, sodass die Raumbeständigkeit der Schlacke gestärkt wird ([4-2] S. 5).

Zusätzlich ist die Umwandlung von Anhydrit in Verbindung mit Wasser zu Bassanit oder direkt zu Gips mit einer Volumenzunahme verbunden ([4-2] S. 6).



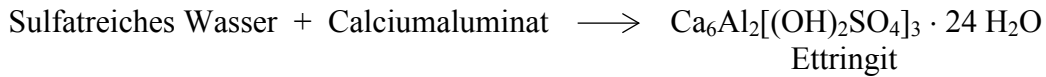
([4-2] S. 6)



([4-2] S. 6)

Schlackeeinhalte, wie Natrium- oder Kaliumchlorid bzw. Natrium- oder Kaliumsulfat beschleunigt die Umwandlungsprozesse, wodurch sehr hohe Drücke entstehen, die zur sogenannten Salzsprengung führen ([4-2] S. 6).

Als Drittes hat sekundär gebildeter Ettringit Einfluss auf die Raumbeständigkeit. Er entsteht bei der Reaktion sulfatreichen Wassers mit Calcium-Aluminium-Komponenten und wirkt während der Gelbildung durch Aufnahme von Wasser treibend ([4-2] S. 6).



([4-2] S. 6)

Da die Sulfatreaktionen Wasser als Ausgangsstoff benötigen, ist eine Möglichkeit, die Raumbeständigkeit der MV-Schlacke zu verbessern, Wasser von der Schlacke fernzuhalten. Gleichzeitig wird so ein Ausspülen von Schadstoffen aus der Schlacke reduziert bzw. verhindert. Der Auffassung des Verfassers nach ist es jedoch in der Praxis nicht möglich, jegliches Wasser von der MV-Schlacke fernzuhalten. Das erste Kriterium, das die Auffassung bekräftigt, ist, dass die Schlacke für eine optimale Verdichtung im feuchten bis nassen Zustand eingebaut werden muss. Als Zweites besitzt das die Schlacke umgebende Erdreich eine dauerhafte Grundfeuchte, die in die Schlacke übergeht, und zum Dritten wird die Schlacke durch Niederschlagswasser befeuchtet.

Während das zuerst angeführte Kriterium absolut unvermeidbar ist, besteht die Möglichkeit, die beiden zuletzt genannten Formen von Wasserzutritten durch eine die Schlacke umgebende Abdichtung zu verhindern. Für eine erfolgversprechende Realisierung einer solchen Maßnahme sind nach Erachten des Verfassers ein überdurchschnittlich hoher Planungsaufwand und eine fachlich versierte sowie gewissenhafte Bauausführung notwendig und selbst dann ist eine vollständige Dichtigkeit nicht zu garantieren, da eine Dichtheitsprüfung der Umschließung unmöglich ist. Weiterhin muss die Abdichtung dauerhaft beständig sein und darf nicht durch Flora, Fauna oder durch die Schlacke selbst zerstört werden. Derartige Abdichtungssysteme werden beispielsweise im Deponiebau durch den Einsatz von Geokunststoffen realisiert. Einige praxisbewährte Herstellungsverfahren solcher Abdichtungen werden von Saathoff / Bräu im Grundbautaschenbuch beschrieben (siehe [4-8] S.793 ff).

Zusätzlich zu Kennwertänderungen, die aus chemischen Reaktionen resultieren, verändern auch mechanische Prozesse die geotechnischen Kenngrößen der MV-Schlacke. Hierzu zählen neben anderen die Spaltung von Körnern durch Frosteinfluss in Verbindung mit Wasser oder die Zerstörung bzw. Deformation von Körnungen in Folge von Druckbelastungen bei der Verdichtung und aus Bauwerkslasten.

Die Setzungsmessungen im Kompressionsversuch verdeutlichen, dass zuletzt genannte Beanspruchungen ein Vielfaches der Stauchungen eines natürlichen Bodens in der Schlacke hervorrufen und die in Abbildung 5.1 visualisierte Setzungsdifferenz zwischen beiden mit anwachsenden Lasten steigt.

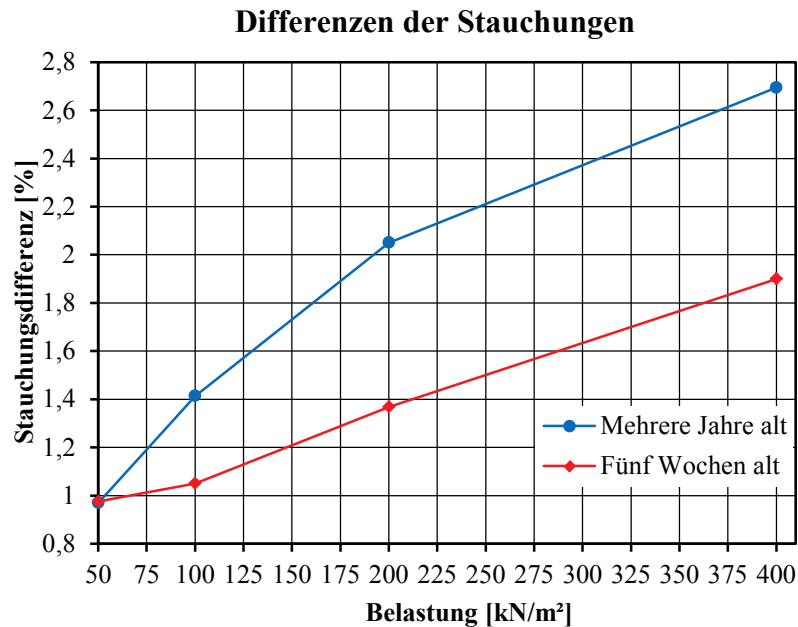


Abb. 5.1 Differenzen der Stauchungen zwischen mehrerer Jahre bzw. fünf Wochen alter MV-Schlacke und Kiessand (siehe auch Abb. 4.38-1)

Die MV-Schlacken qualifizieren sich so aus geotechnischer Sicht allenfalls als Bau- und Gründungsmaterial für Bauwerke mit niedrigen Lasteintragungen in den Boden oder geringem Setzungsanspruch, wie z.B. als Unterbau von Straßen und Plätzen, als Baustoff für Dammkörper von Lärmschutzwällen oder als Gründungspolster von setzungsunempfindlichen Kurzzeitbauwerken, wie Zelthallen und -überdachungen. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Setzungen mit zunehmender Schlackeschichtdicke erhöhen. Festen setzungsempfindlichen Gebäuden und sicherheitsrelevanten Erdbauwerken, wie z.B. Deichen, mit dauerhaft unverändertem Bestand genügt reine MV-Schlacke als Baustoff nicht, da diese Bauwerke überwiegend Gründungslasten über 50 kN/m² hervorbringen und vielfach äußeren Lasten, z.B. dem Wasserdruck auf Deiche, von mehr als 50 kN/m² widerstehen müssen. Bei großflächigen Bauwerken kommt als weiteres disqualifizierendes Kriterium hinzu, dass bei stark differierenden Schlackequalitäten die Gefahr von unterschiedlichen Setzungen in den Vordergrund rückt. Als Folge daraus entstehen erhebliche Bauwerksschäden bis hin zum Verlust der Tragfähigkeit.

Beispiele für mögliche Bauwerksschädigungen:

- Rissbildungen in Mauerwerks- und Stahlbetonkonstruktionen
- Abriss von Tragelementen
- Schiefstellung von Bauwerken
- Verlust von erforderlichen Deichhöhen
- Zerstörung von Dichtungselementen und Verteidigungswegen an Deichanlagen

Wird die offensichtlich von natürlichen Böden abweichende geotechnische Qualität der MV-Schlacke als ausreichend für einen Bodenersatzbaustoff angesehen, sind für die Schlacken in jedem Fall alle relevanten bodenmechanischen und hydraulischen Kenngrößen durch entsprechende Laborversuche mit genügender Probenanzahl nachzuweisen. Im Vorfeld ist hierfür ein den zu erwartenden Schlackequalitäten spezifisch angepasstes Untersuchungskonzept zu erarbeiten.

5.1.2 Labortechnische Gesichtspunkte

Bei allen geotechnischen Laborversuchen gilt grundsätzlich: Durch Steigerung der Anzahl untersuchter Proben ein und desselben Bodens reduziert sich die Möglichkeit einer fehlerhaften Kennwertbestimmung. Als Voraussetzung dafür sind aus einer Gesamtprobe gleichartige Einzelproben herzustellen, die unter reproduzierten Randbedingungen getestet werden. Für weitestgehend homogene Böden sind diese Erfordernisse durchaus realisierbar. In Bezug auf die MV-Schlacken hingegen zeigte sich im Verlauf der Untersuchungen, dass es nahezu unmöglich ist, Proben gleicher Zusammensetzung aus einer Schlackecharge zu gewinnen. Folglich sinkt damit die Wahrscheinlichkeit, dass die ermittelten Kennwerte der Schlacke und auch die der Schlacke-Boden-Gemische das geotechnische Verhalten der jeweiligen gesamten Charge kennzeichnen. Selbst eine zahlenmäßige Erhöhung der Einzelproben kann hier kaum die Präzision steigern, da aufgrund der Schlackeheterogenität jede Einzelprobe ein nahezu neuartiges individuelles Stoffgemisch darstellt.

Die Verdichtung beim Einbau von MV-Schlacke in die Laborgeräte zieht eine Kornzertrümmerung nach sich, wodurch die Körnungslinie und damit auch die geotechnischen Eigenschaften verändert werden. Ein Bezug zu den Eigenschaften des eigentlich als Ersatzbaustoff zu verwendenden Schlackematerials geht damit verloren.

Auch durch die Reaktivität der Schlacke mit Wasser zeigen sich Problematiken in der Versuchsdurchführung. Verfestigungen aufgrund der Carbonatisierung verfälschen Kennwerte wie z.B. den inneren Reibungswinkel, die Kohäsion, den Steifemodul oder die Stauchungen. Verstärkt wird die Verfestigung durch Austrocknung der Proben im Versuchsvorlauf. Zusätzlich beeinflusst die vorrangig aus Sulfatreaktionen herrührende treibende Wirkung in erster Linie Setzungsmessungen, aber auch durch eine aus ihr resultierende Nachverdichtung Durchlässigkeitsuntersuchungen und andere von der Lagerungsdichte abhängige Kennwerte.

Überdies ist die Schlackeaggressivität als problematisch anzusehen, da sie, wie Bild 5.1 erkennen lässt, eine verstärkte Korrosion von Messgeräten bis hin zu deren Unbrauchbarkeit mit sich bringt. Neben daraus resultierenden Messwertverfälschungen sind hier auch wirtschaftliche Aspekte zu betrachten.



Bild 5.1 Korrodierte Messuhr aus Raumbeständigkeitsversuch (eigenes Foto)

Eine intensive Nutzung der Messapparaturen für Schlackeuntersuchungen verringert deren Nutzungsdauer gegenüber einer ausschließlichen Verwendung zur Bodenanalyse und erfordert somit Neuanschaffungen in kürzeren Zeitintervallen.

Die einzige Möglichkeit, Reaktionen der Schlacke mit Wasser zu reduzieren bzw. auszuschließen, ist eine Verwendung von trockenen Proben in den jeweiligen Versuchen. Eine derartige Vorgehensweise ist jedoch nicht in jedem Fall zu realisieren und die ohnehin nur begrenzt mögliche Simulation von realistischen In-situ-Bedingungen in Laborversuchen wird dadurch zusätzlich erschwert.

5.2 Verbesserung der geotechnischen Qualität von MV-Schlacke

Die beiden getesteten Müllverbrennungsschlacken lassen sich unter geotechnischen Gesichtspunkten mit einem Boden vergleichen, der als nur bedingt geeigneter Baugrund einzustufen ist. In der Regel werden derartige Böden ausgetauscht oder aufwendig verbessert bzw. die geplanten Bauwerke mit zusätzlichen Konstruktionselementen den schlechteren Baugrundbedingungen angepasst.

Die Verwendung von MV-Schlacke anstatt eines natürlichen Bodens darf letztendlich jedoch nicht dazu führen, dass damit einhergehende Ressourcenschonungen oder potentielle monetäre Einsparungen durch zusätzlich erforderliche Materialien und Konstruktionen bzw. durch höhere Kosten in der Planung und Ausführung relativiert werden. Für eine Aufweitung des Einsatzspektrums von MV-Schlacke ist es somit unerlässlich, ihre geotechnischen Eigenschaften qualitativ zu steigern.

Vorrangig ist eine solche Qualitätssteigerung durch die Verbesserung der dauerhaften Stabilität von Schlackekörnern zu erreichen. Als alleinige Maßnahmen kommen hierfür nur Optimierungen in den Verbrennungs- und Aufbereitungsprozessen in Frage, da eine Einflussnahme auf die Steuerung des Müllinputs praktisch kaum machbar ist. Das damit zu erreichende Ziel ist eine nahezu vollkommene Eliminierung unverbrannter Materialien und der Metalle aus der Schlacke.

Des Weiteren sind die Lagerungsbedingungen und die Lagerungsdauer im Zuge der Alterung für die geotechnischen Eigenschaften ausschlaggebend. In feuchtem Milieu lagernd, erhöht sich mit der Zeit durch eine abklingende Reaktivität die Raumbeständigkeit der Schlacke. Damit die Alterungsprozesse möglichst gleichmäßig über die gesamte Lagerstätte ablaufen, ist eine regelmäßige Umschichtung und Belüftung der Mieten erforderlich.

Im Anschluss an die Schlackeaufbereitung und -lagerung ist es möglich, eine geotechnische Aufwertung der MV-Schlacke zu erzielen, indem partiell Schlackekornfraktionen durch Körnungen eines natürlichen Bodens ersetzt werden. Zum Vergleich wurde hierzu neben der Ermittlung geotechnischer Kennwerte der reinen Schlacke auch das erdstatische und hydraulische Verhalten von Schlacke-Boden-Gemischen untersucht. Anhand der Versuchsergebnisse in Abbildung 5.2 ist grundsätzlich zu erkennen, dass sich die Kenngrößen dem reinen Kiessand annäherten, gleich welche Kornfraktionen ersetzt worden sind. Besonders deutlich war die Qualitätssteigerung allerdings durch den Austausch der feineren Körnungen 0-4 mm bei den MV-Schlacke-Sand-Gemischen zu erkennen.

Ausgewählte geotechnische Kenngrößen der der MV-Schlacken, der MV-Schlacke-Boden-Gemische und des Kiessandes							
Kennwerte		MV-Schlacke	MV-Schlacke- Kies-Gemisch	MV-Schlacke- Sand-Gemisch	Kiessand		
Proctordichte ρ_{Pr}		[g/cm³]	1,6 - 1,7	1,8	1,9	2,0	
optimaler Wassergehalt w_{Pr}		[%]	15,2 - 18,6	10,6 - 13,7	4,8 - 7,5	5,8	
Steife- modul E_s	Erstbel.	50 kN/m²	[MN/m²]	5	6 - 8	9	114
		100 kN/m²		10 - 47	16 - 28	50 - 159	160
		200 kN/m²		15 - 28	26 - 50	122 - 227	267
		400 kN/m²		28 - 34	40 - 86	212 - 318	355
	Zweitbel.	100 kN/m²		131 - 259	262 - 789	397 - 795	799
		200 kN/m²		121 - 259	225 - 1578	530 - 1586	799
		400 kN/m²		149 - 207	262 - 526	530 - 1586	533
Stauchung ε	Erstbel.	50 kN/m²	[%]	1,01 - 1,02	0,66 - 0,79	0,55 - 0,58	0,04
		100 kN/m²		1,13 - 1,49	0,96 - 0,97	0,58 - 0,68	0,08
		200 kN/m²		1,48 - 2,16	1,16 - 1,36	0,63 - 0,76	0,11
		400 kN/m²		2,07 - 2,86	1,39 - 1,85	0,69 - 0,86	0,17
	Entlast.	200 kN/m²		2,01 - 2,83	1,38 - 1,84	0,68 - 0,85	0,16
		100 kN/m²		1,93 - 2,80	1,37 - 1,80	0,66 - 0,84	0,14
		50 kN/m²		1,86 - 2,76	1,36 - 1,76	0,64 - 0,84	0,13
	Zweitbel.	100 kN/m²		1,90 - 2,78	1,37 - 1,78	0,65 - 0,85	0,14
		200 kN/m²		1,98 - 2,82	1,37 - 1,82	0,67 - 0,86	0,15
		400 kN/m²		2,11 - 2,91	1,41 - 1,89	0,70 - 0,87	0,19
Innererer Reibungswinkel φ'		[°]	44 - 47	43	42 - 43	35	
Kohäsion c'		[kN/m²]	12	9 - 10	3 - 4	0	
k_{10} -Wert	2,0-1,5 m		[m/s]	$3,4 \cdot 10^{-08}$	$8,7 \cdot 10^{-08}$	$2,9 \cdot 10^{-05}$	$5,1 \cdot 10^{-05}$
				$4,5 \cdot 10^{-06}$	$2,6 \cdot 10^{-07}$	$3,7 \cdot 10^{-05}$	
	1,5-1,0 m			$2,0 \cdot 10^{-08}$	$5,2 \cdot 10^{-08}$	$3,0 \cdot 10^{-05}$	$3,0 \cdot 10^{-05}$
				$2,5 \cdot 10^{-06}$	$2,4 \cdot 10^{-07}$	$3,8 \cdot 10^{-05}$	
	1,0-0,5 m			$1,6 \cdot 10^{-08}$	$4,2 \cdot 10^{-08}$	$3,0 \cdot 10^{-05}$	$2,6 \cdot 10^{-05}$
				$2,1 \cdot 10^{-06}$	$2,5 \cdot 10^{-07}$	$3,8 \cdot 10^{-05}$	
	0,5-0,1 m			$2,2 \cdot 10^{-08}$	$4,0 \cdot 10^{-08}$	$3,0 \cdot 10^{-05}$	$3,0 \cdot 10^{-05}$
				$2,2 \cdot 10^{-06}$	$2,5 \cdot 10^{-07}$	$3,7 \cdot 10^{-05}$	

Abb. 5.2 Geotechnische Kenngrößen aus den Versuchen der MV-Schlacken, der Schlacke-Boden-Gemische und des Kiessandes (eigene Abbildung)

5.3 Aspekte des europäischen Sicherheitskonzeptes

In Europa werden der Entwurf und die Bemessung von geotechnischen Bauwerken durch den ersten Teil des Eurocode 7 [3-14] einheitlich geregelt. Für Deutschland sind dazu ergänzend Regelungen im nationalen Anhang zum EC 7-1 [3-15] und der DIN 1054:2010-12 [3-1] festgelegt. Die genannten Dokumente dienen in erster Linie dazu, einen planerischen und rechnerischen Aufwand zu definieren, um die geforderte Sicherheit geotechnischer Bauwerke zu erreichen, wobei sich die nachzuweisenden Sicherheiten der Bauwerke anhand eines Teilsicherheitskonzeptes grundlegend auf Beanspruchungen und Widerstände aufteilen.

Bemessungswert der Beanspruchungen:

$$E_d = E_k \cdot \gamma_E \quad \begin{array}{ll} E_k \rightarrow & \text{charakteristische Einwirkungen} \\ \gamma_E \rightarrow & \text{Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen} \end{array} \quad ([3-1] \text{ S. 23})$$

Bemessungswert der Widerstände:

$$R_d = R_k \cdot \gamma_R \quad \begin{array}{ll} R_k \rightarrow & \text{charakteristische Widerstände} \\ \gamma_R \rightarrow & \text{Teilsicherheitsbeiwert für Widerstände} \end{array} \quad ([3-1] \text{ S. 27})$$

Die Beanspruchungen können aus mehreren unterschiedlichen Einwirkungen bestehen, wobei ständig und veränderlich einwirkende Lasten getrennt voneinander zu bewerten und mit verschiedenen Teilsicherheitsfaktoren zu belegen sind. Die Größe von Teilsicherheitswerten wird in diesem Zusammenhang unter anderem nach der statistischen Streuung der jeweiligen Einwirkungen gewählt. So werden relativ genau zu ermittelnde ständige Größen, wie z.B. Eigengewichte, mit kleineren Teilsicherheiten belegt als veränderliche Einwirkungen.

Treten mehrere veränderliche Einwirkungen unabhängig voneinander auf, besteht die Möglichkeit, diese durch Kombinationsregeln miteinander zu verknüpfen und einzelne von ihnen mit Kombinationsbeiwerten abzumindern, insofern nicht jede Einwirkung in jedem Fall mit ihrem maximalen Bemessungswert auftritt.

Bemessungswert veränderlicher Einwirkungen:

$$Q_{rep} = (Q_{k,1} + \sum \psi_{Q,i} \cdot Q_{k,i}) \cdot \gamma_Q$$

$$\begin{array}{ll} Q_{rep} \rightarrow & \text{repräsentative veränderliche Gesamteinwirkung} \\ Q_{k,1} \rightarrow & \text{veränderliche Leiteinwirkung} \\ Q_{k,i} \rightarrow & \text{veränderliche Begleiteinwirkungen} \\ \psi_{Q,i} \rightarrow & \text{Kombinationsbeiwert der veränderlichen Begleiteinwirkung} \\ \gamma_Q \rightarrow & \text{Teilsicherheitsbeiwert der veränderlichen Gesamteinwirkung} \end{array} \quad ([3-1] \text{ S. 23})$$

Beanspruchungen, deren Ursprung in ständig einwirkender MV-Schlacke liegt und die durch deren heterogene Zusammensetzung nur bedingt genau zu bestimmen sind, werden in der europäischen Normgebung nicht explizit berücksichtigt. Werden die primär als ständige Schlackebeanspruchungen auftretenden horizontalen und vertikalen Eigenlastdrücke genau wie die eines natürlichen Bodens angesetzt, wird so unter Umständen die rechnerisch angestrebte Bauwerkssicherheit nicht erreicht. Aus diesem Grund ist für eine Dimensionierung der Sicherheitsbeaufschlagung von MV-Schlacke-Kennwerten in statischen Berechnungen zuvor festzustellen, mit welcher Genauigkeit die Kenngrößen erhoben worden sind und in welchem Maße die Konstruktionen in der Bauphase an eventuelle durch die Schlackeheterogenität hervorgerufene Kennwertänderungen anzupassen sind. Im Zweifelsfall ist es aus Sicht des Verfassers ratsam, eigentlich ständige Einwirkungen der Schlacke wie veränderliche Größen zu behandeln und diese gegebenenfalls durch Kombinationsbeiwerte anzupassen. Auch besteht die Möglichkeit, spezifisch für einzelne Formen des Erdbaus, z.B. für den Straßen- oder Dammbau, Teilsicherheitsbeiwerte festzulegen. In diesem Zusammenhang ist zusätzlich darauf zu achten, dass Schlackebaustoffe zum Einsatz kommen, deren gleichbleibende Qualität durch ausreichende Erfahrungswerte belegt wird.

Während die Teilsicherheiten der Einwirkungen einheitlich für das gesamte Bauwesen festgelegt sind, werden gesondert für die Geotechnik Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite so definiert, dass die Werteerhöhungen auf der Einwirkungsseite und die Werteabminderungen auf der Widerstandsseite in Kombination das langjährig bewährte globale Sicherheitskonzept widerspiegeln. Veränderliche oder nur zeitweise auftretende Widerstandsgrößen werden im Sicherheitskonzept mit Teilsicherheiten statisch nicht berücksichtigt, was weiterführend bedeutet, dass von veränderlichen MV-Schlacke-Größen ausgehende stabilisierende Widerstände in statischen Berechnungen nicht angesetzt werden dürfen.

In Nachweisen, bei denen erdstatische Widerstände jedoch unerlässlich sind, z.B. beim Grundbruch- oder Gleitsicherheitsnachweis, bleibt nur die Möglichkeit, die Schlackewiderstände als ständige Größen in die Berechnung einfließen zu lassen. Für eine Kompensation von Kennwertschwankungen der MV-Schlacken sind somit, wie bereits im Fall der Einwirkungen beschrieben wurde, die Teilsicherheitsfaktoren entsprechend den Kennwertstreuungen festzulegen.

Kapitel 6

Bau- und geotechnische Sichtweise auf Umweltaspekte

6.1 Diskrepanz zwischen laborchemischer Analyse und geotechnischem Verhalten

Die Einschätzung der Relevanz umweltgefährdender Inhaltsstoffe von MV-Schlacke darf nicht nur auf laborchemischen Analysen beruhen. Vielmehr muss auch das Potenzial betrachtet werden, inwieweit diese Stoffe unter Bedingungen einer bautechnischen Nutzung aus der Schlacke gelöst werden können, wobei das Wasser im Boden als Lösungs- und Transportmittel anzunehmen ist.

Für eine annähernd realistische Simulation der In-situ-Bedingungen bieten sich labor-technische Untersuchungsmethoden ähnlich des Durchlässigkeitsversuches an, bei denen ebenso Wasser als Elutionsmittel verwendet wird. Mit den in Tabelle 6.1 dokumentierten Elutionsverfahren ist es möglich, näherungsweise derartige Bedingungen nachzuempfinden, wobei in keiner Versuchsmethodik reale Strömungsverhältnisse eines Bodens realisiert werden.

Beispiele für Elutionsverfahren				
Testmethode	Probenaufbereitung	Versuchsart	Elutionsmittel	Versuchsdauer
Schüttelversuch nach DIN 38414 Teil 4	Anpassung der Kornfraktionen auf $\leq 10,0$ mm	Schütteln der Probe über Kopf	Destilliertes Wasser	24 h
Schüttelversuch nach DIN EN 12457-4		Umspülen der Probe		
pH _{Stat} -Verfahren				
Trogverfahren	Kornfraktionen $\leq 40,0$ mm			
Säulenversuch nach DIN 19528	Kornfraktionen $\leq 32,0$ mm	Durchströmen der Probe		Sättigungszeit 2 h, Perkulationszeit 5 h

Tab. 6.1 Elutionsverfahren mit destilliertem Wasser als Elutionsmittel
([3-12] S. 3 ff, [3-17] S. 9 ff, [3-19] S. 6 ff, [2-7] S. 13 ff, S. 20 ff)

Einer in situ möglichen Grund-, Schichten- oder Sickerwasserströmung kommen die Methoden des Trogverfahrens ([2-7] S. 13 ff) und des Säulenversuches ([3-19] S. 6 ff) am nächsten, wenn davon auszugehen ist, dass die MV-Schlacke im Bauwerk nur mit unbelastetem Wasser in Kontakt kommt. Auch die Größtkornbeschränkungen in diesen Versuchen genügen in der Geotechnik üblichen Kornbändern. Hinsichtlich der Probengröße erfasst das Trogverfahren ([2-7] S. 13 ff) mit bis zu 2,0 kg Probengewicht am ehesten Einflüsse aus der Heterogenität des Schlackematerials.

Der Säulenversuch ([3-19] S. 6 ff) simuliert als Einziger ein Durchströmen des Probenmaterials in Anlehnung an reale Verhältnisse, wenn auch entgegen der Schwerkraft.

Die Schüttelversuche ([3-12] S. 3 ff, [3-17] S. 9 ff) und das pH_{Stat}-Verfahren ([2-7] S. 20 ff) können alleinig zur Feststellung von Art und Menge eluierbarer Inhalte genutzt werden. Strömungsverhältnisse im Boden und übliche Korngrößenverteilungen werden in den Versuchen nicht berücksichtigt. Aufgrund der geringen Probengrößen in den Versuchen ist es nur mit einer großen Versuchsanzahl möglich, Einflüsse aus den variierenden Stoffzusammensetzungen der Schlacken zu erfassen.

Im Ganzen lässt sich feststellen, dass bei allen genannten laborchemischen Versuchsmethoden die ermittelten Kennwerte, genau wie bei den geotechnischen MV-Schlacke-Untersuchungen, nur punktuelle Zufallsergebnisse aus einer Gesamtcharge sind. Die Versuchsergebnisse spiegeln einzig die Inhaltsstoffe der Proben und deren Elutionsverhalten selbst wider, sodass bei Materialmengen, wie sie im Erdbau benötigt werden, in jedem Fall mit Abweichungen von den Laborergebnissen zu rechnen ist.

6.2 Umweltrelevante MV-Schlackeinhalte in situ

Der sich ständig stofflich verändernde Müllinput nimmt unmittelbaren Einfluss auf die Art und Menge der MV-Schlackeinhalte und verändert somit das Elutionsverhalten der Schlacke. Eine Einflussnahme auf den Brennstoff Müll ist in der Praxis nur schwer zu realisieren, sodass eine Reduktion von umweltbeeinflussenden Stoffaustritten aus der MV-Schlacke während einer geotechnischen Verwendung vorrangig in der Schlackeherstellung bzw. durch bauliche Maßnahmen zu realisieren ist. Erstere bietet beispielsweise Möglichkeiten zur Qualitätssteigerung in der Steuerung des Verbrennungsprozesses mit einhergehender Optimierung der Schlackesinterung und in der spezifischen Anpassung des Aufbereitungsregimes an die Schlacke.

In der Schlackeaufbereitung sind neben der Separation von Metallen, Nichtmetallen und nicht verbranntem Material, die Schlackewäsche sowie eine alterungsbeschleunigende und verstärkt inertisierende Schlackelagerung erfolgversprechende Methoden. Einfaches Waschen der Schlacke reduziert die Gehalte an Kalium-, Natrium-, und Chlorid. In abgeschwächter Form lässt sich der Effekt auch bei einer Lagerung unter Niederschlagseinfluss erzielen.

Auch beschleunigt eine Schlackebewässerung die Sulfatreaktionen im Alterungsprozess, bei denen sich unter anderem Calciumsulfat löst und abtransportiert wird.

Die Alteration der Schlacke lässt sich zusätzlich durch Zwangsbelüftung intensivieren, wodurch Carbonatisierungsreaktionen und damit die Bildung von Calcit angeregt werden. Hierbei kommt es vermehrt zu einer Fixierung von Schwermetallen wie Blei und Zink im Kristallgitter des Carbonates.

Mit dem Abtrennen bzw. Ersetzen von elutionsinstabilen Kornfraktionen ist ein weiterer Aufbereitungsprozess zur umweltrelevanten Qualitätssteigerung zu nennen. Besonders feine Schlackekörnungen sind in diesem Zusammenhang hinsichtlich einer Elution von Schwermetallen zu erwähnen. Ist es aufgrund geotechnischer Belange nicht möglich, derartige Korngrößen aus dem Gefüge zu entfernen, kann die Schwermetallkonzentration im Eluat auch durch einen Austausch mit unbelastetem Bodenmaterial erreicht werden.

Wurde die Schlacke bereits einer geotechnischen Verwendung zugeführt, gilt es, die Elution umweltrelevanter Schadstoffe auf ein Minimum zu reduzieren und Wasser als Schadstofftransportmittel von der Schlacke möglichst fernzuhalten. Eine gänzlich trockene Lagerung der Schlacke im Erdreich ist jedoch unmöglich, da einerseits beim Schlackeeinbau und deren Verdichtung Wasser unabdingbar ist und andererseits bereits im Boden enthaltenes Wasser durch Kapillarkwirkung in die Schlacke übergehen kann. Zur Reduzierung der hier möglichen Wasserzutritte und Elutionen kann eine erdseitige Abdichtung beitragen. Eine vollkommene Sicherheit der Stoffbindung in der Schlacke ist aber auch damit nicht garantiert. Der Schlackedurchsickerung mit Oberflächen- und Niederschlagswasser kann durch Abdeckung mit wasserdichten Belägen und Überbauten entgegengewirkt werden. Hierbei sind zusätzlich potentielle Sickerwege von Wasserumläufigkeiten zu bewerten und gegebenenfalls so zu unterbrechen bzw. umzuleiten, dass Sickerwasser die MV-Schlacke nicht erreicht.

Ergänzend zu den abdichtenden Konstruktionen sind natürliche Boden- und Grundwasserhältnisse in die Bauwerksplanungen mit einzubeziehen. So bilden wasserstauende Schichten unter Umständen Barrieren gegenüber der Ausbreitung eluierter Stoffe. Sie können aber auch die Anstauung von Schichtenwasser forcieren, das somit von unten in die Schlacke eindringen kann. Ähnlich verhält es sich bei wechselnden Grundwasserständen oder bei durch die Baumaßnahme geschaffenen Entspannungsmöglichkeiten von gespannten Grundwasserleitern. In diesen Fällen reicht es nicht aus, Mindestabstände zu Grundwasserständen zum Zeitpunkt der Erkundung einzuhalten, sodass weiterführend eine Bestimmung der maximal möglichen Wasserstände unabdingbar ist. Lassen sich die Grundwasserhorizonte nicht zweifelsfrei festlegen, sollte von einer Verwendung der MV-Schlacke Abstand genommen werden.

Als besondere Situation in der Verringerung von Stoffausbreitungen sind auch die nicht zu vernachlässigenden Havariefälle zu betrachten. In Bezug auf eine geotechnische Verwendung von MV-Schlacken stellt in erster Linie die Zerstörung von Schutzkonstruktionen, welche die Ausbreitung von Eluaten und Schlackefeststoffen verhindern sollen, einen solchen Havariezustand dar, bei dem es dennoch nicht zu einer unkontrollierten Ausbreitung von umweltrelevanten Eluaten und Schlackefeststoffen kommen darf. Zur Eingrenzung bzw. Abwendung genannter Stoffausbreitungen werden grundsätzlich zwei Wege verfolgt. Erstens helfen redundante Schutzeinrichtungen und zweitens eine maximal mögliche Reduktion von umweltbelastenden Schlackeeinhalten deren Ausbreitung einzugrenzen.

Präventiv gilt es jedoch, Havariefälle mit Schadstoffausbreitungen zu vermeiden. Bereits in der Planung sind deswegen Baumaßnahmen einer Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich der Anwendung von MV-Schlacke als Baustoff zu unterziehen.

In Anbetracht dessen ist von einer MV-Schlackeverwendung in wasserbaulichen Maßnahmen mit ständig oder häufig am Bauwerk anstehendem Wasser abzuraten.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Seit 1. Juni 2005 müssen in Deutschland Siedlungsabfälle und andere Abfälle mit biologisch abbaubaren Bestandteilen vor ihrer Ablagerung thermisch oder mechanisch-biologisch behandelt werden. Die Methode, Müll durch Verbrennung zu inertisieren, dient zusätzlich der Strom- und Energiegewinnung und nimmt somit eine zentrale Stellung in der Abfallbehandlung ein, sodass auch zukünftig mit einem ständigen Aufkommen an Müllverbrennungsschlacke zu rechnen ist.

Bisher wurde MV-Schlacke neben anderen Verwertungswegen vorrangig im Deponiebau verwendet. Mit einem in Zukunft rückläufigen Deponie- und Langzeitlagerbau sowie einem steigenden Schlackeaufkommen erhöht sich der Bedarf an neuen Verwendungsmöglichkeiten, die zu großen Teilen im Bereich der Geotechnik zu finden sind.

Bei der Verwendung von Schlacke als Ersatz für konventionelle Böden sind grundlegend zum einen ihre geotechnische Eignung zu prüfen und zum anderen Umweltaspekte zu betrachten. Letztere Kriterien sind erfüllt, wenn von der MV-Schlacke die in der LAGA Mitteilung 20 festgelegten Eluatgrenzkonzentrationen des Zuordnungswertes Z 2 als Obergrenzen eingehalten werden. In diesem Fall ist eine Verwendung in der Einbauklasse 2 nach LAGA M 20 möglich. Werden die Grenzen überschritten, darf die MV-Schlacke einer geotechnischen Verwendung nicht mehr zugeführt werden und es bleibt nur die Verbringung der Schlacke auf eine Deponie. Inwieweit die zurzeit geltenden Kriterien realen erdbaulichen Situationen genügen, bleibt weiteren Überprüfungen vorbehalten.

Die geotechnische Eignung von MV-Schlacke ist auf der Grundlage von bauwerkspezifischen Anforderungen zu beurteilen, die durch geotechnische Kennwerte definiert werden. Folglich ist es unumgänglich, auch die MV-Schlacke wie einen natürlichen Boden zu analysieren und ihre bodenmechanischen sowie hydraulischen Kenngrößen anhand standardisierter Versuche zu ermitteln.

Da es sich bei Müllverbrennungsschlacke um ein anthropogenes bodenähnliches Material handelt und nicht um einen natürlich entstandenen Boden, spiegeln nicht alle Ergebnisse dieser Versuchsmethoden bedingungslos das geotechnische Verhalten der Schlacken in situ wider und es ist zuvor in jedem Fall zu beurteilen, inwieweit sich die Methoden zur Schlackeuntersuchung eignen. Gegebenenfalls werden hier spezielle Anpassungen der Versuchsmethoden und unkonventionelle Interpretationen erforderlich.

Auch die Übertragung von an Laborproben ermittelten Bodenkenngrößen der Schlacke auf großvolumige Chargen oder Schlacken anderer Chargen ist oft, trotz gleicher Korngrößenklassifikationen, nicht möglich. Der ausschlaggebende Grund dafür sind die in Abbildung 7.1 aufgeführten wesentlichen Unterschiede zwischen Boden- und Schlackekonglomeraten.

Unterschiede zwischen Boden- und Schlackekonglomeraten		
	Gewachsener Boden	MV-Schlacke
Inhaltsstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Annähernd homogene mineralische Zusammensetzung - teilweise mit organischen Beimengungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogene Zusammensetzung, deren organische, anorganische, und mineralische Anteile abhängig vom Müllinput sowie vom Verbrennungs- bzw. Aufbereitungsregime sind
Korngerüst	<ul style="list-style-type: none"> • Konstante chargenunabhängige Fraktionierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Chargenabhängige Korngrößenverteilung
Dauerhaftigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Bei konstanten Umweltbedingungen langfristig annähernd gleichbleibende Bodenkenngrößen 	<ul style="list-style-type: none"> • Alterungsabhängige bis zu mehreren Jahren anhaltende Veränderung geotechnischer Kenngrößen

Abb. 7.1 Geotechnische Unterschiede zwischen Böden und MV-Schlacken

Werden statisch relevante Bodeneigenschaften wie die Proctordichte, die Scherfestigkeit und das Setzungsverhalten näher betrachtet, zeigt sich, dass die MV-Schlacke, ausgenommen des inneren Reibungswinkels und der Kohäsion, niedrigere Werte besitzt als ein Boden mit gleicher Kornverteilung und demnach in Bauwerken einen geringeren Widerstand gegenüber äußeren und inneren Einwirkungen bietet. Weitere deutliche Unterschiede zwischen Boden und MV-Schlacken sind hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit festzustellen. Obgleich der untersuchte Boden die gleiche Körnungslinie wie die beiden analysierten MV-Schlacken besitzt, erwiesen sich die Schlacken als erheblich undurchlässiger.

Eine Angleichung von geotechnischen MV-Schlacke-Kennwerten an Böden lässt sich mit einem Austausch von Schlackekornfraktionen durch entsprechende Bodenkörnungen erzielen. Als besonders effektiv erwies sich dahingehend das Ersetzen feiner Fraktionen bis 4,0 mm.

Auch im Langzeitverhalten sind die MV-Schlacken differenziert zu Böden einzustufen. Ihre Raumbeständigkeit ändert sich je nach stofflicher Zusammensetzung und Aufbereitungsmethoden, wobei in ihr chemischen Reaktionen mit Volumenzunahme bis zu mehreren Jahren anhalten können. Zusätzlich sind über einen gesamten Bauwerksnutzungszeitraum erhebliche Veränderungen durch Frost-Tau-Einflüsse zu erwarten.

Ähnlich wie bei der Verbesserung der geotechnischen Eigenschaften von MV-Schlacke ist auch ihr Langzeitverhalten durch Zumischen von Boden oder einen partiellen Kornersatz durch Bodenkörnungen aufzuwerten.

Zusammenfassend sind die Müllverbrennungsschlacken als ein bodenähnliches Recyclingmaterial einzustufen, das einem natürlichen gewachsenen Boden nicht gleichwertig ist. Dennoch lassen sich auf der Grundlage der ermittelten Schlackeeigenschaften und unter der Voraussetzung einer gezielten bauwerksspezifischen Kennwertermittlung Anwendungen in Bereichen der Geotechnik finden, denen die bodenmechanische, hydraulische und chemische Qualität von Müllverbrennungsschlacke genügt. Als potentielle Anwendungen sind beispielsweise Gründungen von Bauwerken mit niedrigem Lasteintrag oder geringem Anspruch an das Setzungsverhalten beziehungsweise Erdbauwerke, bei denen Verformungen weniger relevant sind, zu nennen.

Zukünftige geotechnische Analysen von MV-Schlacke sind dahingehend auszurichten, die standardisierten bodenmechanischen Laborversuche sowie dafür verwendete Apparaturen an die speziellen MV-Schlackeanforderungen anzupassen. Die Größe der Versuchsreihen ist dabei so zu wählen, dass schlackespezifische Sicherheitsfaktoren für die entsprechenden Kennwerte aus den Versuchsergebnissen abzuleiten sind. Zusätzlich sind die Methoden zur Bestimmung umweltrelevanter Schlackeeinhalte vorherrschenden In-situ-Bedingungen anzunähern.

Andere zukünftige Betrachtungen ergeben sich hinsichtlich einer Optimierung der geotechnischen MV-Schlacke-Qualität, wobei in diesem Zusammenhang speziell der Einfluss der Korngrößenverteilung auf das geotechnische Verhalten von MV-Schlacken zu untersuchen ist.

Literaturverzeichnis

1. Bundesgesetzblätter, Bundesanzeiger

- [1-1] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ [Hrsg.]:
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln 2012

- [1-2] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ [Hrsg.]:
Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall - TASI) – Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz vom 14. Mai 1993 (BAnz. Nr. 99a vom 29.05.1993).
Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln 2012

- [1-3] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ [Hrsg.]:
Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung-
AVV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. Dezember 2001
(BGBl. I S. 3379), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 22 des Gesetzes vom
24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212). Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln 2012

- [1-4] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ [Hrsg.]:
Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) in der
Fassung der Bekanntmachung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert
durch Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973).
Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln 2013

- [1-5] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ [Hrsg.]:
Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen
(Abfallablagerungsverordnung - AbfAbIV) in der Fassung der Bekanntmachung vom
20. Februar 2001 (BGBl. I S. 305), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung
vom 13. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2860). Bundesanzeiger Verlag GmbH,
Köln 2006

- [1-6] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ [Hrsg.]:
Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen -
17. BImSchV in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Mai 2013
(BGBl. I S. 1021, 1044). Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln 2013

2. Merkblätter, Richtlinien, Regeln

- [2-1] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV), ARBEITSAUSSCHUSS „ERD- UND FELSARBEITEN“ UND ARBEITSGRUPPE „ERD- UND GRUNDBAU“ [Hrsg.]:
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 09). FGSV Verlag, Köln 2009
- [2-2] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV), ARBEITSGRUPPE „GESTEINSKÖRNUNGEN, UNGEBUNDENE BAUWEISEN“ [Hrsg.]:
Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB2004). FGSV Verlag, Köln 2007
- [2-3] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV), ARBEITSGRUPPE „GESTEINSKÖRNUNGEN, UNGEBUNDENE BAUWEISEN“ [Hrsg.]:
Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04). FGSV Verlag, Köln 2008
- [2-4] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV), ARBEITSGRUPPE „MINERALSTOFFE IM STRAßENBAU“ [Hrsg.]:
Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau (M HMVA). FGSV Verlag, Köln 2005
- [2-5] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) UNTER VORSITZ DES MINISTERIUMS FÜR UMWELT UND FORSTEN RHEINLAND-PFALZ [Hrsg.]:
Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 19, Merkblatt der Landesarbeitsgemeinschaft Abfall für die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle. Mainz 1994
- [2-6] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) UNTER VORSITZ DES MINISTERIUMS FÜR UMWELT UND FORSTEN RHEINLAND-PFALZ [Hrsg.]:
Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln - Allgemeiner Teil. Mainz 2003
- [2-7] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) UNTER VORSITZ DES MINISTERIUMS FÜR UMWELT UND FORSTEN RHEINLAND-PFALZ [Hrsg.]:
Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 33, Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen und chemischen Untersuchungen von Abfällen, verunreinigten Böden und Materialien aus dem Altlastenbereich, Herstellung und Untersuchung von wässrigen Eluaten, Kurzbezeichnung: EW 98. Mainz 2002

3. DIN-Normen

- [3-1] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 1054:2010-12, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau –
Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2010
- [3-2] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 4022-T1:1987-09, Baugrund und Grundwasser – Benennen und Beschreiben
von Boden und Fels. Beuth Verlag GmbH, Berlin 1987
- [3-3] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18121-1:1998-04, Baugrund – Untersuchungen von Bodenproben –
Wassergehalt, Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung. Beuth Verlag GmbH,
Berlin 1998
- [3-4] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18123:2011-04, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der
Korngrößenverteilung. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011
- [3-5] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18124:2011-04, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der
Korndichte – Kapillarpiknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer.
Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011
- [3-6] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18127:2011-08 (Entwurf), Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben –
Proctorversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011
- [3-7] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18128:2002-12, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des
Glühverlustes. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011
- [3-8] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18130-1:1998-05, Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben – Bestimmung
des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Teil 1: Laborversuche. Beuth Verlag GmbH,
Berlin 1998
- [3-9] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18135:2011-04 (Entwurf), Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben –
Eindimensionaler Kompressionsversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011
- [3-10] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18137-3:2002-09, Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben – Bestimmung
der Scherfestigkeit, Teil 3: Direkter Scherversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2002
- [3-11] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 18196:2011-05, Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische
Zwecke. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011

- [3-12] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN 38414 Teil 4, Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4). Beuth Verlag GmbH, Berlin 1984
- [3-13] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN EN 1367-1:2007-06, Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2007
- [3-14] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN EN 1997-1:2009-09 - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2009
- [3-15] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN EN 1997-1/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2012
- [3-16] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN EN 10002-1:2001-12, Metallische Werkstoffe – Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2001
- [3-17] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN EN 12457-4:2002, Charakterisierung von Abfällen, Auslaugung – Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen, Teil 4 Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits- / Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung). Beuth Verlag GmbH, Berlin 2002
- [3-18] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN EN 12879:2001-02 Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2001
- [3-19] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN EN 19528:2009-01, Elution von Feststoffen – Perkulationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2009
- [3-20] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN EN ISO 14688-1:2011-06 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011
- [3-21] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.]:
DIN ISO 10319:1996-06, Geotextilien – Zugversuch am breiten Streifen. Beuth Verlag GmbH, Berlin 1996

4. Bücher, Zeitschriften, Berichte

- [4-1] DEHOUST, G., GEBHARDT, P. und GÄRTNER, S.:
Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschonung. Öko-Institut e.V., Büro Darmstadt, Im Auftrag der Interessengemeinschaft der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD), Darmstadt 2002
- [4-2] PFRANG-STOTZ, GUDRUN und REICHELT, JÜRGEN:
Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Wissenschaftliche Berichte FZKA 7025, Karlsruhe 2005
- [4-3] REIMANN, DIETER O.:
Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacke – Gesamtübersicht. Müll und Abfall Heft 9, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 1992
- [4-4] RENDEK, EVA, DUCOM, GAËLLE und GERMAIN, PATRICK:
Influence of waste input and combustion technology on MSWI bottom ash quality. International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, Volume 27, Issue 10, Pages 1273-1476, Amsterdam 2007
- [4-5] STATISTISCHES BUNDESAMT [Hrsg.]:
Umwelt. Abfallentsorgung. Vorläufiger Ergebnisbericht für ausgewählte Entsorgungsanlagen. 2011. Wiesbaden 2013
- [4-6] TOHMÉ-KOZMIENSKY, KARL JOACHIM:
Thermische Abfallbehandlung, EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH, Berlin 1994
- [4-7] MÜLLHEIZKRAFTWERK ROTHENSEE GMBH [Hrsg.]:
Annahmebedingungen und Annahmekatalog. Stand: 1. Oktober 2007. Magdeburg 2007
- [4-8] WITT, KARL JOSEF [Hrsg.]:
Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren. 7. Auflage, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaft GmbH & Co. KG, Berlin 2009

5. Internet

- [5-1] ECOPROG GMBH [Hrsg.]:
Waste to Energy. Der Weltmarkt für Müllverbrennungsanlagen 2012 / 2013. Leseprobe. Köln 2012. http://www.ecoprolog.com/fileadmin/user_upload/leseproben/leseprobe_marktstudie_muellverbrennung_ecoprolog.pdf
Download am 09.03.2013

Thesen zur Dissertation

„Geotechnische Untersuchung und Bewertung bautechnischer Eignung von Müllverbrennungsschlacken und deren Gemischen mit Böden“

vorgelegt von Sven-Henning Schlömp

Zielstellung der Arbeit

Als Folge umweltpolitischer Zielstellungen mit entsprechender Abfallgesetzgebung wird in Deutschland ein bedeutender Müllanteil thermisch behandelt, woraus sich aufgrund großer anfallender Mengen an Müllverbrennungsschlacken (MV-Schlacken) ein Bedarf an neuen Verwertungsmöglichkeiten der Schlacken ergibt.

Die MV-Schlacken stellen ein bodenähnliches Recyclingmaterial dar, das potentielle Verwendungsfelder in Bereichen der Geotechnik findet.

Die vordergründig bodenähnlichen Eigenschaften der MV-Schlacken und nicht zuletzt die Forderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes legen eine Nutzung als Massenbaustoff u.a. im Tiefbau nahe.

Trotz ihrer bodenähnlichen Eigenschaften unterscheiden sich MV-Schlacken in ihrem mechanischen Verhalten deutlich von klassischen Böden, wie zum Beispiel in ihrem Verhalten gegenüber Wasser, in ihrem Verdichtungsverhalten, in ihrer Kornstabilität und ihrem Langzeitverhalten.

Für die Verwendung der MV-Schlacken im Tiefbau ist ein gezielter Erkenntniszuwachs hinsichtlich ihrer geotechnischen Eigenschaften notwendig.

Die Durchführung und Auswertung von standardisierten geotechnischen Laborversuchen erfordert schlackespezifische Versuchsanpassungen und -interpretationen.

Bislang existieren nur unzureichende Erfahrungen hinsichtlich der Anwendbarkeit geotechnischer Laborversuche, der damit einhergehenden Fehlerquellen und der Übertragbarkeit von Kennwerten auf große MV-Schlacke-Chargen sowie auf MV-Schlacken anderer Chargen.

In dieser Arbeit werden grundlegende geotechnische MV-Schlacke-Kennwerte in Abhängigkeit vom Schlackealter ermittelt und auf ihre Plausibilität bezüglich der Laborproben selbst wie auch der Entnahmekargen geprüft.

Die Aufwertung der geotechnischen MV-Schlacke-Qualität durch eine Vermischung der Schlacken mit Kornfraktionen natürlicher Böden wird ergänzend untersucht.

Speziell wird eine Methode zur Ermittlung der Raumbeständigkeit von MV-Schlacken in der Triaxialzelle erarbeitet.

Wissenschaftliche Erkenntnisse der Arbeit

Aufgrund der heterogenen stofflichen Zusammensetzung von MV-Schlacken ergeben sich beträchtliche Streubreiten in den Versuchsergebnissen und eine Übertragung der ermittelten geotechnischen Kennwerte auf große Chargen ist nur bedingt zu realisieren.

Eine individuelle schlacke- und projektoptimierte Methodik der Kennwertermittlung ist zwingend erforderlich. – Vorgaben und Erfahrungswerte des Tief-, Wasser- und Verkehrsbaus allein sind nicht zielführend.

Chemische Inhaltsstoffe und deren Reaktionen untereinander sowie deren Reaktionen mit Wasser beeinflussen die Versuchsergebnisse und beschränken eine bautechnische Nutzung der MV-Schlacken. – Hinsichtlich ihrer geotechnischen Verwendung sind die derzeit dafür definierten Randbedingungen widersprüchlich.

Eine von Wasser isolierte Kennwertermittlung bzw. bautechnische Verwendung ist unmöglich. – Versuchsapparaturen unterliegen aus diesem Grund einem erhöhten Verschleiß und es ist mit einer Elution von umweltrelevanten Stoffen zu rechnen.

MV-Schlacken erreichen grundsätzlich nicht die geotechnische Qualität eines natürlich gewachsenen Bodens. – Sie unterscheiden sich trotz bzw. neben ihren bodenähnlichen Eigenschaften in ihrem mechanischen Verhalten deutlich von klassischen Böden.

Die bodenmechanischen Unterschiede zeigen sich beispielsweise im Verhalten gegenüber Wasser, im Verdichtungsverhalten, durch Auftreten von Kornzertrümmerungen in der MV-Schlacke bei der Verdichtung oder anderen Lasteintragungen und in den Veränderungen von Eigenschaften über die Zeit.

Durch spezifische Anpassungen an den Müllinput im Verbrennungsregime und Steuerung des Aufbereitungsregimes entsprechend der MV-Schlacke-Inhalte sowie mittels einer Gemischbildung aus MV-Schlacken und natürlichen Böden werden die geotechnischen MV-Schlacken-Eigenschaften denen eines Bodens angenähert.

Mit dem Austausch von kleinen MV-Schlacke-Körnungen durch entsprechende tonige bis feinkiesige Kornfraktionen natürlicher Böden werden effektiv Verbesserungen der geotechnischen Qualität von MV-Schlacke erzielt.

Auf der Grundlage der dargestellten Untersuchungen wird festgestellt, dass eine Nutzung der MV-Schlacken als geotechnischer Baustoff grundsätzlich möglich ist, diese jedoch durch das spezielle mechanische Verhalten und die chemischen Inhaltsstoffe begrenzt wird.

Bedeutung der wissenschaftlichen Erkenntnisse

Die geotechnischen Untersuchungen bieten neue öffentlich zugängliche Erkenntnisse im direkten geotechnischen Vergleich zwischen MV-Schlacken und natürlichen Böden sowie bezüglich der Einflussnahme auf geotechnische Eigenschaften von MV-Schlacke-Boden-Gemischen.

Aus den Versuchsergebnissen und aus den bei ihrer Ermittlung festgestellten Problematiken lassen sich Randbedingungen für die Erarbeitung von Untersuchungskonzepten bei einer potentiellen MV-Schlacke-Verwendung in der Geotechnik ableiten, wodurch explizit ein Beitrag zur optimalen Bauwerksprojektierung geleistet wird.

Durch den Wissenszuwachs in Bezug auf bodenmechanische und hydraulische MV-Schlacke-Eigenschaften lassen sich Verwendungsmöglichkeiten von MV-Schlacken in der Geotechnik gezielter selektieren.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der MV-Schlacke-Boden-Gemische befähigen zu projektspezifischen Materialanpassungen und erweitern so das Verwendungsspektrum von MV-Schlacke.

Ausblicke

Zentral gesammelte geotechnische Kennwerte von MV-Schlacken bilden die Grundlage einer statistischen Ermittlung von Kennwertstreuungen, woraus sich Sicherheitsbeiwerte für Bauwerksberechnungen definieren lassen.

Eine Analyse, inwieweit die Korngrößenverteilung das geotechnische Verhalten von MV-Schlacken beeinflusst, eröffnet unter Umständen neue Sichtweisen auf die Optimierung der geotechnischen MV-Schlacke-Qualität.

Ein Vergleich differenter Mischungsverhältnisse von MV-Schlacke-Boden-Gemischen ermöglicht genauere Anpassungen an bauwerksspezifische Randbedingungen.